安全性を考慮した集団下校経路の作成
—階層型施設配置モデルの適用—

吉田　祐太，今井　桂子

近年，小中学生の登下校時を狙った事件，事故が多発している．そのため，集団で下校することで安全を確保することが重要視されてきている．年度の初めに集団下校の班分けをする作業は生徒数が少なければ，それほど手間ではないかもしれない．しかし，生徒数が少なくても突発的な事件や事故の際に，通れない地域や道路が出現するなど下校経路に制約ができてくると，それに応じた班分けを考えるのはそう簡単なことではない．また，新入生が多い大規模な学校における年度初めの班分けは生徒の家の位置だけではなく，様々な要素を考慮して行われるであろうが，そのような作業時にも，ある程度の班分けの案があると作業がしやすいと考えられる．そこで，生徒の家と学校の位置情報と道の安全性から，集団下校の経路と集団を決定する手法を提案し，計算機実験によって解の検証を行った．

キーワード：集団下校，階層型施設配置モデル，安全マップ

1. はじめに

平成19年上半期だけで，未就学の子どもから中学生まで，子どもを狙った事件は40,000件以上にも及んでいる．そこで，地域によっては保護者が登下校の時間に見回りをしたり，生徒と付き添い下校したりと，さまざまな対策がとられている．また，文部科学省では，生徒の登下校の安全確保について警察庁などの関係省庁と連携を図りながら，学校安全に関する様々な施策を推進している．その中で各学校の取り組み事例として，集団下校に関するものがいくつか挙げられている．本研究では以下の理由から，集団下校に焦点をあてて議論を進めることにする．もちろん，提案する手法を集団登校に適用することも可能である．

登校時は学校への登校時間が決まっていることから，事件や事故が発生した場合には，保護者や学校関係者が付き添うなどの対応が比較的容易に可能である．しかし，下校に関しては学年や生徒によって下校時間が異なる場合があり，下校班が決まっていても，下校時間が不確定のため，保護者らが付き添うことが困難であり，通常，生徒のみで下校しなければならないと考えられる．保護者や学校関係者が対応することになったとしても，通常の下校経路を変更する必要が生じたり，下校班のメンバーを組み替えなければならなくなったりする．このような状況を考えると，登校時よりも下校時の班分けや経路についての考察が必要である．

集団下校では，下校時の生徒の安全を確保するために，ある一定人数以上の規模の集団で一緒に下校する．集団下校の方法は大きく分けて，主な集団下校の経路は指定された場所まで集団で下校し，そこからは各自家に帰るという一斉解散と，学校から集団で下校をしながら自分の家が近づいたらその時々に解散していく途中解散の2つの方法が挙げられる．あらかじめそれぞれの集団が決まっていれば経路を求めやすいが，突発的な事件や事故に対応して，新しく集団を考え直し経路を求めることはとても大変である．そこで本研究では，地域のデータと学校，生徒の家の位置，道の安全性を考慮して集団下校の班と経路を決定する方法を考えていく．

本研究では，利用者から見て適した場所に施設と，施設へ向かう途中で経由する点である中継点を配置するモデルである，文献[6]によって定式化された階層型施設配置モデルを，集団下校経路の決定に利用している．

2. 集団下校経路

ここでは，生徒は徒歩で学校へ通っているものとし，1つの学校と複数の生徒の家が道路ネットワーク上に存在すると仮定する．道路ネットワークには点間の距離が重みとして付加されているが，ここでは距離を次

よしだ　ゆうた
㈱みずほトラストシステムズ
〒182-0022 調布市国領町8-2-15
いまい　けいこ
中央大学 理工学部
〒112-8551 文京区春日1-13-27

のように考えることにする.

最近，生徒に対して地域の安全性を認識させるために，安全マップを作る取り組みがなされていることが多い．安全マップとは生徒が自ら地域を調査し，教師や保護者と話をしながら，危険な場所や道路を地図に書き込んだものをいう．このような作業を通して，生徒は地域の安全性に対する認識を確立し，教師や保護者は子どもたちの目線に立った危険性を再確認できるとされている．このような安全マップがある場合には，通常の距離に危険度を加味した距離を定義することによって，危険な道を避ける経路を求めることができる．以下では，単に「距離」と表記しているが，安全マップを作成している場合や，事件・事故などに対応する場合は，それらの危険度に応じて距離を仮想的に長くしたものを本稿における「距離」として用いれば良い．

本研究で考える集団下校とは次のような下校方法である．生徒は集団下校の班のどれかに属し，各班ごとに解散場所を決める．そして，学校から解散場所まで班で下校し，解散場所から自分の家へ帰る経路を求める（図1）．モデルによっては，学校から解散場所を経由せずに直接家に帰ることを許す場合もある．

また本研究では，集団下校を行う際に以下のことを仮定する．

- 生徒が安全に下校することのできる経路を選ぶ．安全の指標は生徒の歩く距離の総和によって表すことにするため，生徒は常に与えられたネットワークの最短経路を通るとする．ただし，道に危険度が定義されている場合は，危険度の重みを考慮した最短経路を計算することになる．
- 集団で下校することは，1人で下校することよりも安全とする．
- 集団でも1人でも，歩く速度は一定であるとする．

これらのことを踏まえて，集団下校経路を決定する手法を考えていく．

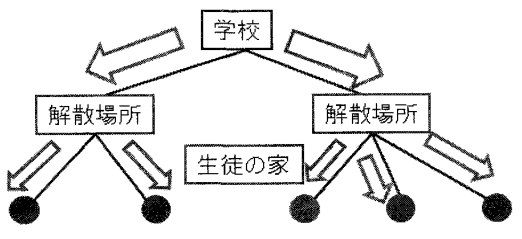

図1　本研究で考える集団下校

3．施設配置モデルによる定式化

施設配置問題とは，新たに施設を立地するとき，利益や利用者から利用しやすい場所を考慮し，最も好ましい立地場所を数理的に求める問題である[4]．施設配置問題を1つは平面上（連続的モデル），もう1つはネットワーク上（離散的モデル）で考えることができるが，ここでは道路ネットワークを扱うのでネットワークモデルとして考えることにする．

ネットワーク上の施設配置問題の例としては，センター問題，メディアン問題がある．センター問題は，需要点から施設までの最も遠い距離を最小にする点を求める問題であり，メディアン問題は，需要点から施設までの距離の総和が最小になる点を求める問題である．集団下校問題における生徒の家を需要点，解散場所を施設と考えると，生徒の歩く距離の総和を最小にするためには，各班の解散場所の決定をメディアン問題と考えることができる．

このモデル化では，生徒の家の情報のみから生徒を p 個の班に分け，各班に対して，解散場所から生徒の家までの距離の総和が最も小さくなるように解散場所を決める．そして，学校から各解散場所までは班ごとに一緒に帰る下校方法である．

例として図2のような，学校と生徒の家の位置を考えてみる．ここでの生徒数は80である．学校の位置を四角形で，生徒の家を円で表示している．このとき，$p=8$ とした場合の p-メディアン問題を用いた班分けと解散場所の結果を図3に示す．楕円で囲まれた生徒が同じ班になり，生徒は学校から所属する班の解散場所まで向かい，そこから最短距離を通って家に帰る．

p-メディアン問題を用いたモデル化による問題点として，次のようなことが挙げられる．このモデル化

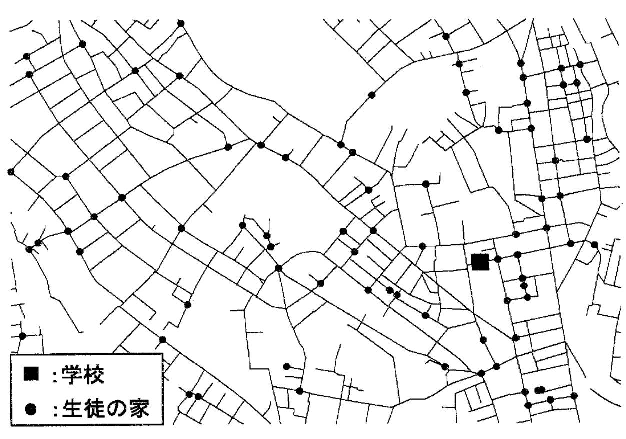

図2　ネットワーク上の学校と生徒の家の位置

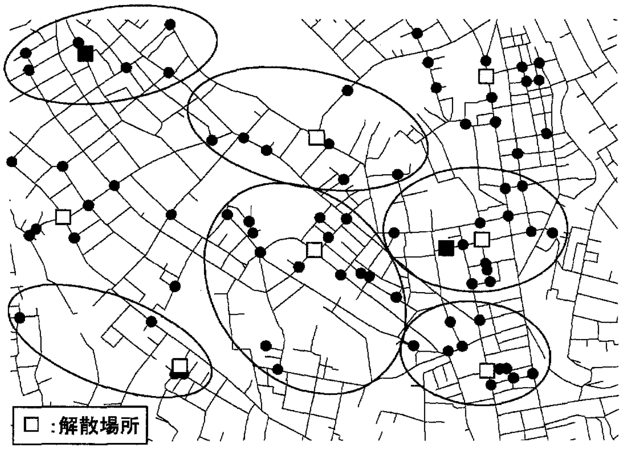

図3　p-メディアンを用いた班分けと解散場所(p=8)

においては，学校を考慮せず，生徒の家の位置のみから班分けを行い，各班に属している生徒の家の中心に近い場所に，解散場所を配置することになる．各班の中心に近い場所に解散場所が配置されてしまうと，学校から解散場所へ向かう途中で自分の家を通り過ぎてしまう生徒が出てきてしまい，このような生徒にとっては，下校経路が長くなる．特に，学校の近くに住んでいる生徒の中には，解散場所から同じ道を戻って家に帰らなければならない生徒がいる．そこで，学校の位置を考慮し学校に近い生徒は直接家へ帰ることを許す班分けと解散場所を決定する手法を考えるために，階層型施設配置モデルを用いることにする．

4.　階層型施設配置モデル

階層型施設配置モデルでは施設をいくつかの層に分け，ある層の下に次の層の施設が配置されると考える．例えば，空港の集合におけるハブ空港の配置問題がこのような階層型施設配置問題の典型例であるといえる．階層型施設配置問題に関しては，文献[5]に分類構成や種類などが載っている．k個の階層を持つ階層型システムでは，最も上の階層をk階層，最も下の階層を1階層とし，各階層には施設が配置される．利用者は0階層に割り当てられるとする．

Bermanらは文献[1]において，複数の施設の場所が固定されており，中継点の場所を求め，利用者がどの中継点を通り，どの施設を利用するかを決めるMLTP (Multiple Location of Transfer Points) と，MLTPにおいて施設の場所が固定されていない場合を扱うFTPLP (Facility and Transfer Points Location Problem) という階層型施設配置のモデルを提案し定式化している．FTPLPはMLTPの拡張と考えられる．

本稿では，学校から解散場所を経由して家まで帰るか，学校から直接家へ帰る下校経路を求めたい．そこで，解散場所と学校という2つの階層から成る施設配置モデルを用いる．一番上の2階層を施設（学校），1階層を中継点，0階層を利用者（生徒）とする．学校の場所は固定されているため，MLTPと考えられる．本研究ではSasakiら[6]が提案したFTPLPとしての階層型施設配置問題に対するフローを用いた定式化の方が変数や制約条件の数が少ないため，こちらの定式化を用いて集団下校の集団と経路を求めることにする．

4.1　班分けと解散場所の決定

与えられたネットワーク上の点集合をNとする．学校の位置を表す点を$s \in N$，生徒の家の集合をCとする．$C \subset N$となっている．解散場所の位置や班分けにおいて学校を考慮するためには，学校を1つの層の施設と考え，中継点をもう1つの層の施設とし，どちらも解散場所として選択することができるようにしなければならない．学校以外の解散場所の数pは入力として，あらかじめ定められたものとする．

まず，用いる変数の説明を述べる．

- t_{ij}：点$i \in N$と点$j \in N$のネットワーク上の最短距離．
- z_j：もし，点$j \in N$が解散場所に選ばれた場合は$z_j=1$，そうでない場合は$z_j=0$となる0-1変数．
- ϕ_{ij}：点$i \in N$と解散場所$j \in N$の間の流量．
- ψ_{js}：中継点$j \in N$と学校$s \in N$の間の流量．
- d_i：$i \in C$ならiに住んでいる生徒の数，$i \in N-C$なら$d_i=0$．
- M：十分大きな値．ここでは$M=\sum_{i \in N} d_i$としている．

$$\min \quad \sum_{i \in N}\sum_{j \in N} t_{ij}\phi_{ij} + \alpha \sum_{j \in N} t_{js}\psi_{js} \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in N} \phi_{ij} = \sum_{k \in N} \psi_{jk} \quad (j \in N) \tag{2}$$

$$\sum_{j \in N} \phi_{ij} = d_i \quad (i \in N) \tag{3}$$

$$\sum_{i \in N} \phi_{ij} \leq M z_j \quad (j \in N) \tag{4}$$

$$\sum_{k \in N} \psi_{jk} \leq M z_j \quad (j \in N) \tag{5}$$

$$\sum_{j \in N} \psi_{jk} = 0 \quad (k \in N - \{s\}) \tag{6}$$

$$\sum_{j \in N} \psi_{js} \leq M \tag{7}$$

$$\sum_{j \in N} z_j = p+1, \quad z_s = 1 \tag{8}$$

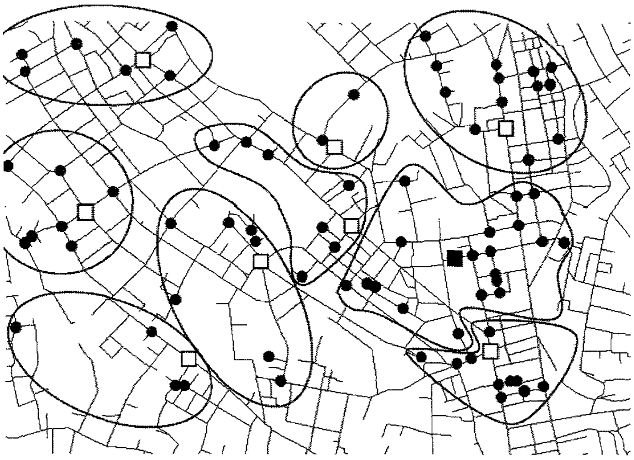

図4　提案手法の班分け($p=8$)

$$\phi_{ij} \geq 0 \quad (i, j \in N) \tag{9}$$

$$\psi_{jk} \geq 0 \quad (j, k \in N) \tag{10}$$

$$z_j \in \{0, 1\} \quad (j \in N) \tag{11}$$

この定式化では，学校から解散場所までの移動距離と，解散場所から各生徒が家まで帰る移動距離の総和を最小化している．目的関数における$0<\alpha<1$の値は，一人での下校よりも集団下校を行うことの良さを表している．また，制約式(8)は学校が施設であることを表し，学校も中継点として扱うことで直接学校から帰る生徒を許している．

図2における学校と生徒の家に対して，提案手法を用いることで得られた結果が図4である．図3と比較すると，全体的に，解散場所の位置が集団の中において学校寄りに配置されている．また，学校から直接家へ帰る生徒がいることが分かる．

4.2　解散場所からの下校経路決定手法

前節では，班分けと各班の解散場所を求めた．ここでは，解散場所から各生徒の家に帰る方法を考えよう．解散場所からの下校方法として，2通りの方法が考えられる．1つは，解散場所から各自の家へ直接帰る一斉解散であり，もう1つは，解散場所から同じ方向に家がある生徒が一緒に帰り，家が近づいた生徒から何人かずつに分かれていく，途中解散である．一斉解散については，前節で得られた解散場所から各自の家への最短経路が下校経路となるので，この場合の経路は容易に求められる．そこで，以下では途中解散の方法を考えることにする．

本研究で考える途中解散においては，以下のことを仮定する．図5はその様子を示したものである．ここでは班の人数がそれほど多くないことを仮定し，同じ階層の中継点を複数設けることは考えていないが，そのような場合にも適用することは可能である．

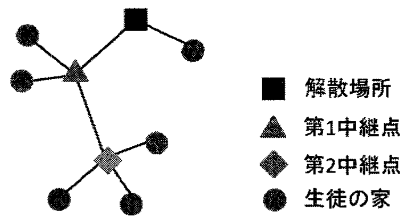

図5　本研究で考える途中解散

- 解散場所から近い生徒は解散場所から直接家へ帰る．
- 解散場所から家へ向かう途中に第1中継点，第2中継点の2箇所設ける．そのため，階層としては3階層目を解散場所，2階層目を第1中継点，1階層目を第2中継点とする3つの階層を持つ施設配置モデルを考える．
- 第1中継点で数人の生徒が解散し，第2中継点においても数人の生徒が解散し各自家へと帰るとする．
- 第1中継点を通らずに第2中継点に向かうことは許さない．

また，解散場所から第1中継点へ集団で向かうことのメリットをα，第1中継点から第2中継点へ集団で向かうメリットをβとする．解散場所から第1中継点までの人数は，第1中継点から第2中継点への人数より多いことからαの方が安全性のメリットがあると考えるので，$\alpha<\beta$となる．また，3階層となることで新たに定義した変数は次のものである．

x_j：点jが第1中継点，第2中継点に選ばれたかどうかを表す0-1変数．

y_k：点kが第1中継点に選ばれたかどうかを表す0-1変数．

z_l：点lが解散場所に選ばれたかどうかを表す0-1変数．

ϕ_{ij}：点iと第2中継点jの間の流量．

ψ_{jk}：第2中継点jと第1中継点kの間の流量．

ρ_{kl}：第1中継点kと解散場所lの間の流量．

この3階層の施設配置モデルは以下のように定式化できる．

$$\min \quad \sum_{i\in N}\sum_{j\in N} d_{ij}\phi_{ij} + \alpha \sum_{j\in N}\sum_{k\in N} d_{jk}\psi_{jk} + \beta \sum_{k\in N}\sum_{l\in N} d_{kl}\rho_{kl} \tag{12}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i\in N}\phi_{ij} = \sum_{k\in N}\psi_{jk} \quad (j\in N) \tag{13}$$

$$\sum_{j\in N}\psi_{jk} = \sum_{l\in N}\rho_{kl} \quad (k\in N) \tag{14}$$

$$\sum_{j\in N}\phi_{ij}=d_i \quad (i\in N) \tag{15}$$

$$\sum_{i\in N}\phi_{ij}\leq Mx_j \quad (j\in N) \tag{16}$$

$$\sum_{k\in N}\psi_{jk}\leq Mx_j \quad (j\in N) \tag{17}$$

$$\sum_{j\in N}\psi_{jk}\leq My_k \quad (k\in N) \tag{18}$$

$$\sum_{k\in N}\rho_{kl}\leq Mz_l \quad (l\in N) \tag{19}$$

$$\sum_{j\in N}\psi_{jk}\leq M(y_k-z_k) \quad (k\in N) \tag{20}$$

$$z_j\leq y_j\leq x_j, \quad j\in N \tag{21}$$

$$\sum_{j\in N}x_j=3, \sum_{k\in N}y_k=2, \sum_{l\in N}z_l=1 \tag{22}$$

$$\phi_{ij}\geq 0 \quad (i,j\in N) \tag{23}$$

$$\psi_{jk}\geq 0 \quad (j,k\in N) \tag{24}$$

$$x_j, y_j, z_j\in\{0,1\} \quad (j\in N) \tag{25}$$

目的関数は，解散場所もしくは，第2中継点から家へ帰る生徒の歩く距離の総和，解散場所から第1中継点まで集団でいることのメリット α を考慮した歩く距離の総和，第1中継点から第2中継点まで集団でいることのメリット β を考慮した歩く距離の総和であり，これを最小化している．

制約式(20)において，y_k，z_k は0-1変数であるので第2中継点に選ばれた点 j から出るフローは，(y_k-z_k) が正の値になる場合のみに許される．もし，解散場所に点 z_k が選ばれるとしたら，$z_k=1$ となり y_k の値が1になった場合でもフローは許されない．フローが流れるのが許されるのは，$y_k=1$ であり $z_k=0$ となる場合のみである．よって，点 k が第1中継点として選ばれ，施設として選ばれていない場合のみ第1中継点からのフローを得る．これにより，解散場所から第1中継点を通らずに直接第2中継点に向かうことを禁止することができる．

図6は図4における1つの班に対して，提案手法により計算機実験によって求めた途中解散の経路である．左下の学校から解散場所へ向かい，解散場所から第1中継点，第2中継点を通って途中解散をしていく様子がわかる．

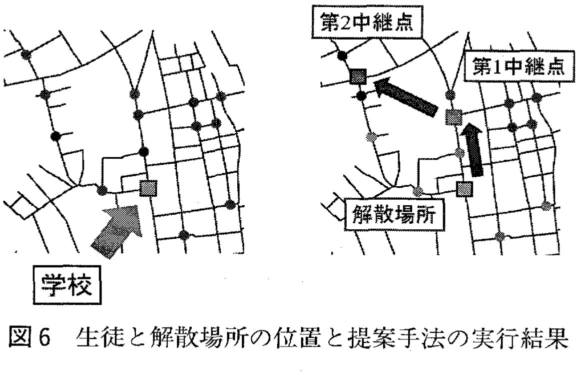

図6　生徒と解散場所の位置と提案手法の実行結果

5.　提案手法に対する考察

生徒数や解散場所の数を変えていくつかの計算機実験をしたところ，階層型施設配置モデルを用いた提案手法の方が，通常の p-メディアン問題による手法よりも学校に近い位置に解散場所を設定することができた．それにより，家の前を通り過ぎて解散場所に向かい，もう一度家の方向に帰るという生徒の数を減らすことができた．その意味では，早く帰宅させるという目的にかなった解になったといえるだろう．解散場所からの下校方法においても，解散場所から様々な方向へ帰るよりは，ほとんどの生徒が学校と逆の方向へ帰る方が，一人で歩く距離が短いと考えられる．したがって，一人で歩く距離が短いという観点から，p-メディアン問題による解散場所よりも，階層型施設配置により得られた解散場所の方が適切であるといえる．

解散場所の数 p は入力として与えたが，p と生徒の人数，家の位置によっては，班の人数が少なくなってしまう可能性がある．このような場合には，最少人数を定め，適切な p の値も求めることが必要であろう．

解散場所からの下校経路については，3階層の階層型施設配置モデルを用いることで途中解散を提案した．いくつかの例に対して計算機実験を行ったところ，一人で歩く距離が一斉解散と途中解散でほとんど変わらない場合もあった．また，一人にならないような経路が選択されるために，歩く距離が長くなってしまう場合もあった．実際に，一斉解散と途中解散のどちらが良いかは，班を構成する生徒の人数や家の位置に依存してしまう．集団で下校することのメリットである α，β の値によっても結果が変わってくる．危険の度合いや集団のメリットは各学校，場面によって大きく変わると考えられるため，その時々で適切な値の設定が必要となる．

実際に集団下校経路を求めたい場合，いくつの班が良いか，一斉解散と途中解散のどちらが良いか，α や β の値をいくつにしたらよいかなど，何種類もの解を人手によって構成するのは手間がかかりすぎる．そこで，道路ネットワークと生徒の家のデータを入力し，提案手法に対するパラメータを一度設定しておけば，生徒の家のデータが更新されたときも，同じパラメータで計算を行い，もし不都合であればパラメータを変えて実行してみることが可能である．

6. おわりに

本研究では，生徒の家と学校の位置情報のみから階層型施設配置モデルを用いることで集団下校の経路を決定する手法を提案した．班分けと下校経路の決定については，学校の位置を考慮することで解散場所まで向かう途中で自分の家を通り過ぎる生徒を減らすことができた．

班の数をいくつにすれば良いかについては，本研究では考えていない．班の構成人数や家の位置などを考慮し，適切な下校班の数を求めることができればより適切な班分けができると考えられる．また，生徒の人数に応じて階層数を決め，階層を増やすことを可能にすることや学年の考慮などが考えられる．解散場所からの下校経路を求める際に，本研究では3階層として求めたがより多くの階層を考えることで，より生徒の家が近づいたときに途中解散をしていくことが可能である．また，班を作る際の制約として学年や班の人数を考慮することでより現実的で安全な班分けができると考えられる．

道の安全性を距離に含めることで，本手法を適用することは可能であるが，実際に危険度をどのように定めるのが適切かに関してはまだ指標がない．生徒の安全を考えるためには，そのような指標を作る必要があると考える．

今回，集団下校経路問題のモデル化とその解法を提案した．実際に適用するには，まだ解決しなければならないことも残っているが，このような研究が少しでも，生徒の安全な通学の役に立てば幸いである．

謝辞　本研究の一部は科学研究費補助金，中央大学特定課題研究の補助を受けて行った．

参考文献

[1] O. Berman, Z. Drezner and G. O. Wesolowsky, "The facility and transfer points location problem," *International Transactions in Operational Research*, 12 (2005), 387-402.

[2] 文部科学省，文部科学省ホームページ，http://www.mext.go.jp/

[3] S. C. Narula, "Hierarchical location-allocation problems: A classification scheme," *European Journal of Operational Research*, 15 (1984), 93-99.

[4] 岡部篤行，鈴木敦夫，"最適配置の数理，" 朝倉書店，1992.

[5] G. Şahin and H. Süral, "A review of hierarchical facility location models," *Computers and Operations Research*, 34 (2007), 2310-2331.

[6] M. Sasaki, T. Furuta and A. Suzuki, "Exact optimal solutions of the minisum facility and transfer points location problems on a network," *International Transactions in Operational Research*, 15 (2008), 295-306.