

需給バランスを考慮した病床配分最適化モデル

M2013SS011 鈴木まみ

指導教員：佐々木美裕

1 はじめに

現在の日本は、世界でも類を見ない超高齢社会に突入し、医療サービスに対する需要が増加する中、需要に対する供給力の不足が問題となっている。病院情報局 [1] では、入院患者数の将来予測値から、2025年と2040年の地域別必要病床数を試算し、病床の過不足数を全国、都道府県別、二次医療圏別で試算している。全国で、入院患者数が年々増加していくという予測がされており、2040年には既存病床数では病床が不足するという試算結果となっている。入院患者数の増加の要因として、高齢者の増加が考えられる。また、入院患者の多くが高齢者となることを考えると、地域格差なく居住地近くの施設で治療を受けられる体制を整えることが重要である。

医療サービスだけでなく、介護サービスや、消防、救急などの公共サービスでも同様に、地域格差のないサービスの提供が望まれる。しかし、このようなサービスは、すべての地域に公平にサービスを提供することは難しく、需要と供給との間に大きな差が出ている場合がある。これまでに、地域によって需要と供給との間にどれほどの差があるのかを指標を用いて可視化し、需要と供給との間の差の解消を目指した研究が行われてきた。需要と供給のバランス(需給バランス)を表す指標を、河端 [2] や鵜飼ら [3] が提案した。河端 [2] は、保育所の需要を待機児童数、供給を保育所の定員として指標の計算を行った。鵜飼ら [3] の提案した指標は、供給点から見た需要点への配分と需要点から見た供給点からの配分に基づくものであり、需要量を患者数、供給量を入院病床数として指標の計算を行った。これらの研究は、需要点から供給点への移動を頻繁に行うようなサービスを例に研究を行っている。そのため供給点の利用者は、居住地から近い施設を利用するよう、需要点から供給点への距離に制限(閾値)を設けている。

2 需給バランス指標

本研究で用いる需給バランスは、医療サービスなどのサービスを提供する施設を供給点、その施設を利用する人を需要としたときの需要と供給におけるバランスを考慮することとする。

本研究で用いる需給バランスを表す指標(以下、需給バランス指標)を需要点 i の需要量に対する、需要点 i へ配分された供給力の比として定義する。この指標の値が1以上であれば、需要点 i への供給が十分であることを示し、1未満であれば、需要点 i への供給が不足していることを表す。指標について説明するため、以下のように記号を定義する。

I : 需要点の集合

J : 供給点の集合

w_i : 需要点 $i \in I$ の需要量

c_j : 供給点 $j \in J$ の供給力。

x_{ij} : 供給点 $j \in J$ から需要点 $i \in I$ への供給力の配分以上の記号を用いて、需要点 i における需給バランス指標を以下に定義する。

$$\frac{\sum_{j \in J} x_{ij}}{w_i}$$

このとき、 $\sum_{i \in I} x_{ij} = c_j$ とし、各供給点の供給力を需要点へ配分することによって指標の計算を行う。 x_{ij} の値によって指標の値が変化するので、どのようにして x_{ij} を決定するかを考える必要がある。鵜飼ら [3] は、供給点から需要点への供給量の配分と需要点から供給点への需要量の配分を交互に繰り返し計算し、収束値を求め、その値から指標の値を求めた。本研究では、 x_{ij} を変数とし、数理モデルを用い最適化計算を行うことにより、 x_{ij} を決定し、需給バランス指標の値の計算を行う。さらに、各需要点間の指標の差を計算することによって需給バランスの格差を示し、格差を縮小するための需給バランス改善モデルを提案する。なお、ここで求める配分は実際の供給点の利用について制限するものではない。

3 需給バランス指標を求めるためのモデル

前章で定義した需給バランスを表す指標を求めるためのモデルとして、2つのモデルを提案する。1つ目は、全ての需要点が全ての供給点を利用できるとし、各供給点の供給力を各需要点へ配分し、この配分を決定するモデルである。このモデルを供給力配分モデルとする。需要点から供給点への移動距離に閾値を設けず、需要点から供給点への重み付き距離コストの総和を最小化することを目的とし、どの需要点間においても指標の値の差が一定値以下となる配分を求めることとする。2つ目のモデルとして、供給力配分モデルに距離閾値に関する制約を加えたモデルを考える。このモデルを距離閾値付き供給力配分モデルとする。このモデルでは、需要点から距離閾値以内の供給点からのみ供給力を配分することができ、各需要点間の指標の値の差を最小化することを目的とする。

4 需給バランス改善モデル

需要点間の需給バランスの差を小さくするため、3つの改善策を提案する。

4.1 供給力再配分モデル

1つめの改善策は、対象の地域全体の総供給力を各供給点へ再配分し、供給点の供給力を変えることである。このモデルでは、再配分後の各供給点の供給力と、供給点から需要点への供給力の配分を決定する。

定式化にあたり、需給バランス指標の説明で用いた記号に加え、記号を以下のように定義する。

d_{ij} : 需要点 $i \in I$ と供給点 $j \in J$ の距離。

D : 施設と需要点の間の距離の閾値.

a_{ij} : $d_{ij} \leq D$ のとき 1, それ以外のとき 0 をとる定数.

M : 大きな数.

次に, 決定変数を定義する.

z_j : 供給点 $j \in J$ に再配分する供給力.

α : 各需要点間の指標の差の最大値.

定式化は以下の通りである.

$$\text{Minimize } \alpha \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i \in I} x_{ij} = z_j, \quad j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} z_j = \sum_{j \in J} c_j \quad (3)$$

$$\left| \frac{\sum_{j \in J} x_{i_1 j}}{w_{i_1}} - \frac{\sum_{j \in J} x_{i_2 j}}{w_{i_2}} \right| \leq \alpha, \quad i_1 \in I, i_2 \in I \quad (4)$$

$$x_{ij} \leq M a_{ij}, \quad i \in I, j \in J \quad (5)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i \in I, j \in J \quad (6)$$

$$z_j \geq 0, \quad j \in J. \quad (7)$$

目的 (1) は, 各需要点間の指標の差の最大値の最小化を表す. 式 (2) は, 供給点の供給量とその供給点からすべての需要点への配分の総和が等しいことを表す. 式 (3) は, 再配分後の供給点の供給力が再配分前の供給力と等しいことを表す. 式 (4) は, 各需要点間の指標の差を α 以下とすることを表す. すなわち, α は各需要点間の指標の差の最大値となる. 式 (5) は, 需要点から供給点への距離が閾値内であれば供給点から配分できることを表す. 式 (6) (7) は非負制約である.

4.2 供給力投入モデル

2 つめの改善策として, 対象の地域全体に供給力を投入することを考える. このモデルでは, 各供給点への投入量と, 供給点から需要点への供給力の配分を決定する.

定式化にあたり, 供給力再配分モデルの記号に加え記号を以下のように定義する.

ε : 小さな数.

次に, 決定変数を定義する.

y_j : 供給点 $j \in J$ に投入する供給力.

定式化は以下の通りである.

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} y_j \quad (8)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i \in I} x_{ij} = c_j + y_j, \quad j \in J \quad (9)$$

$$\left| \frac{\sum_{j \in J} x_{i_1 j}}{w_{i_1}} - \frac{\sum_{j \in J} x_{i_2 j}}{w_{i_2}} \right| \leq \varepsilon, \quad i_1 \in I, i_2 \in I \quad (10)$$

$$y_j \geq 0, \quad j \in J. \quad (11)$$

$$(5), (6)$$

目的 (8) は, 総投入量の最小化を表す. 式 (9) は, 供給点の供給力に投入量を加えたものとその供給点からいずれかの需要点への配分の総和が等しいことを表す. 式 (10) は, 各需要点間の指標の差を ε 以下とすることを表す. 式 (11) は非負制約である.

この定式化は, 需給バランスの地域格差をなくすような最小の投入量を求めている. 総投入量を一定数とし, 式 (10) の ε を変数として最小化することによって, 一定の供給力を投入した時の指標の差を, 現状より小さくする配分を求めるモデルとなる.

4.3 新規供給点配置モデル

3 つめは, 新規に供給点を配置することで, 地域全体の総供給力を増やすことである. このモデルでは, 新規供給点の供給力と, 供給点から需要点への供給力の配分を決定する.

定式化にあたり, 新しく記号を以下のように定義する.

K : 候補点の集合.

f_{ik} : 需要点 $i \in I$ と候補点 $k \in K$ の距離.

b_{ik} : $f_{ik} \leq D$ のとき 1, それ以外のとき 0 をとる定数.

P : 新規供給点の配置数.

次に, 決定変数を定義する.

y_k : 供給点 $j \in J$ に投入する供給力.

z_{ik} : 新規供給点 $k \in K$ から需要点 $i \in I$ への配分.

定式化は以下の通りである.

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} z_{ik} \quad (12)$$

s.t.

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = c_j, \quad j \in J \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} y_k = P \quad (14)$$

$$\left| \frac{\sum_{j \in J} x_{i_1 j} + \sum_{k \in K} z_{i_1 k}}{w_{i_1}} - \frac{\sum_{j \in J} x_{i_2 j} + \sum_{k \in K} z_{i_2 k}}{w_{i_2}} \right| \leq \varepsilon, \quad i_1 \in I, i_2 \in I \quad (15)$$

$$z_{ik} \leq M b_{ik} y_k, \quad i \in I, k \in K \quad (16)$$

$$z_{ik} \geq 0, \quad i \in I, k \in K \quad (17)$$

$$y_k \in \{0, 1\}, \quad k \in K. \quad (18)$$

$$(5), (6)$$

目的 (12) は, 新規に配置する供給点の総供給力の最小化を表す. 式 (13) は, 供給点の供給力とその供給点からすべての需要点への配分の総和が等しいことを表す. 式 (14) は, P 個の新規供給を配置することを表す. 式 (15) は, 各需要点間の指標の差を ε 以下とすることを表す. 式 (16) は, 需要点から新規供給点への距離が閾値内であり, 候補点に供給点が配置されれば, 配分できることを表す. 式 (17) は非負制約, 式 (18) はバイナリ制約である.

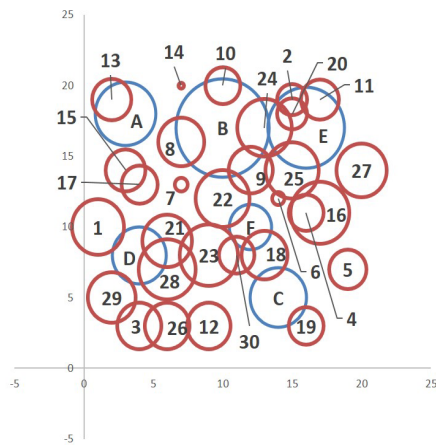


図1 テストデータ

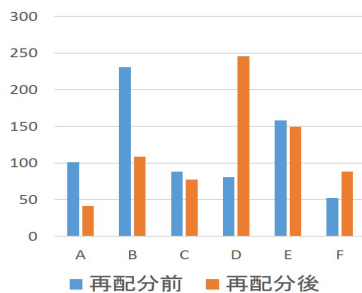


図2 供給力再配分モデル 供給力の比較

5 計算実験と結果の分析

5.1 テストデータの作成

モデルの特徴や違いを知るため、テストデータを作成し、計算実験を行った。テストデータを図1に示す。供給点数が6、需要点数が30のデータとなっており、青色の円が供給点、赤色の円が需要点を表している。円の面積はそれぞれ、供給点の供給量、需要点の需要量の大きさを表している。

距離閾値を $D = 5.5$, $\varepsilon = 10^{-5}$ とした。計算に使用したソフトウェアは、IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.5 を使用した。

5.2 供給力再配分モデル

供給点の再配分前と再配分後の供給力を比較したものを図2に示す。供給点AやBは現状の約半分の供給力があれば十分であるが、供給点Dでは約3倍の供給力を持つことが必要となっている。

5.3 供給力投入モデル

最小投入量は378となり、供給点Cに71、供給点Dに204、供給点Fに103の供給力を投入するという結果となった。また、指標の値はすべての需要点で0.6759となった。投入前は供給点Bが最大の供給力であり、供給点Dは2番目に少ない供給点であったが、投入後には供給点Dが最大の供給力となり、供給点Bは2番目に大きい供給力を持つ供給点となった。投入量を100としたと

き、供給点Dに100投入するという結果となり、投入量を200、300と増やしていくと供給点Dに加え、供給点Fに投入するという結果となった。需給バランス指標の値の小さい地域に配分している供給点から順に供給力を投入している。

5.4 新規供給点配置モデル

候補点の集合として需要点の集合を用い、新規供給点の配置数を $P = 2$ として実行した。実行結果を図3に示す。青色の数字が新規に配置された供給点を表している。新規供給点として需要点4に160.1769の供給力、需要点28に217.628の供給力を持つ供給点を配置するという結果となった。需要点29に新規供給点を配置する結果となったが、需要点29には、供給点Dからも配分されている。これは、距離閾値以内かどうかのみを考えているため、最も近くの供給点からの配分が可能であったとしても、距離閾値以内の別の供給点から配分されてしまうことがあるからである。

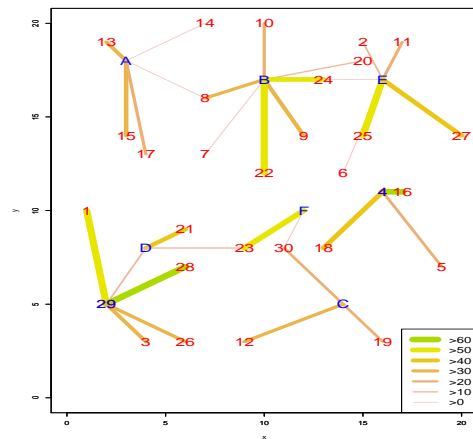


図3 新規供給点配置モデル

5.5 結果の分析

供給力再配分モデルは、現状のすべての供給力を最大限に有効活用したときの配分であるといえる。しかし、供給力の少ないところに増やすことはそれほど難しくはないが、現状存在している供給力を減らすということは難しいのではないかと考えられる。供給力投入モデルや新規供給点配置モデルでは、総供給力を増やしている。需給バランスの差が大きいと、供給力の足りていないところに集中して多くの供給力を投入する結果となった。現実には、供給点の規模によって多くの供給力を投入することが難しいと考えられる。供給点へ投入できる量や新規に配置する供給点の供給力に制限を設けたモデルを考える必要があると考える。

6 実データの計算実験

6.1 データの準備

計算に使用する実データとしては、神奈川県二次医療圏を対象とした。供給点は、DPC(診断群分類包括評価)

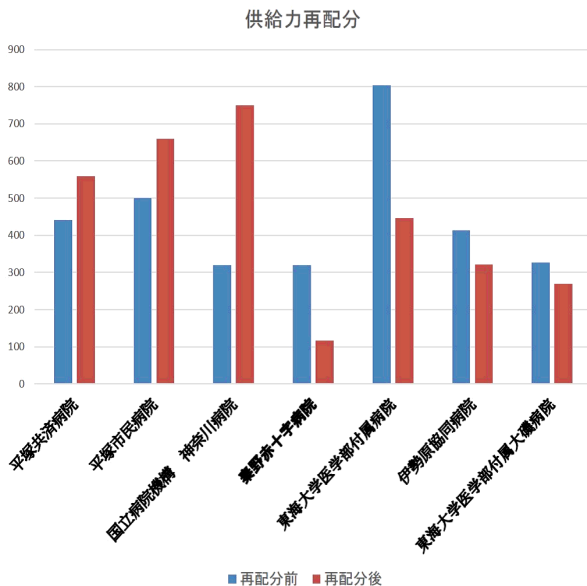


図 4 湘南西部 供給力再配分モデル 比較

対象病院，DPCに関するデータ提供のみを行うDPC準備病院（以下，合わせてDPC参加病院）とし，病院情報局 [1] から入手した．供給量は，各病院の一般病床数を用いる．需要点は，平成22年度国勢調査（小地域）から取得した町丁目の代表点とし，需要量を町丁目の人口とした．指標の計算にあたり，人口が0である需要点にも0.1の需要が存在するとした．また，このようにすることでその町丁目の仮想的な需給バランスを求め，評価することが可能となる．これは近隣の町丁目の指標の過小評価につながるが，得られる指標に与える影響は少ないと考えられる．

6.2 実行結果

湘南西部医療圏の実行結果について示す．距離閾値はすべてのモデルで $D = 4\text{km}$ とし， $\epsilon = 10^{-5}$ とした．また，新規供給点配置モデルにおいて，DPC参加病院以外で一般病床を持つ5つの病院を候補点とした．

図4は，供給力再配分モデルの実行前の供給力の大きさと，実行後の供給力の大きさを比較したものである．平塚共済病院，平塚市民病院，神奈川病院で現状の供給力より再配分後の供給力の方が多くなっている．逆に，泰野赤十字病院，東海大学医学部付属厚原病院，伊勢原協同病院，東海大学医学部付属大磯病院で再配分後の供給力のほうが少なくなっている．特に神奈川病院では，現状の2倍近く供給力が必要であるのに対し，泰野赤十字病院や，東海大学付属病院では，現状の約半分の供給力となっている．

次に供給力投入モデルの実行結果を示す．最小投入量は，1780となり，平塚共済病院に795，平塚市民病院に79，神奈川病院に721，東海大学医学部付属大磯病院に185の供給力を投入するという結果となった．

次に，新規供給点配置モデルで， $P = 2$ としたときの実行結果を示す．図5は，供給点の位置に加え，候補点をひ



図 5 湘南西部 新規供給点配置モデル

し形で示し，新規に配置された供給点の位置を赤色，選ばれなかった候補点を青色で示す．平塚病院に1060，ぐす葉台病院に720の供給力を持つ供給点を配置するという結果となった．

どのモデルでも，神奈川病院の周辺や平塚共済病院，平塚市民病院の周辺に供給力を増やしており，現状では供給力が少ないことがわかる．平塚共済病院，平塚市民病院の周辺では，距離閾値以内に供給点はあるが，それ以上に人口が多いので供給力不足していると考えられる．逆に，神奈川病院周辺は距離閾値以内の供給点が少なく，1つの供給点に需要が集中しているためであると考えられる．

7 おわりに

需給バランスの地域格差を縮小するため，3つの改善策を提案し，それぞれに対するモデルの提案を行った．供給力再配分モデルは，対象とする地域内における現状の供給力の総和を再配分して指標の差を縮小することを考えている．したがって指標の値は需要に対して供給力を均等に配分したときの値となる．供給力投入モデルと新規供給点配置モデルでは，現状の供給力を増やし，供給が不足している地域の供給力を増やすことで，指標の差を減らし，需給バランス指標の値の小さい地域が，指標の最大値に合わせるように追加する供給力を求めている．今回は指標の差を縮めることを考えたモデルの提案をしたが，指標の差が大きいと，その差を埋めるために多くの供給力を投入しなければならず，実際には簡単ではない．すべての需要点で指標の値が一定値以上となるように，供給力の投入を行うモデルも考えることができる．

参考文献

- [1] 病院情報局：http://hospia.jp/
- [2] 河端瑞貴：待機児童と保育所アクセシビリティ -東京都文京区の事例研究-，応用地域学研究，15，1-12，2010．
- [3] 鶴飼孝盛，佐々木美裕：空間的な需給バランスを表す新しい指標の提案 -神奈川県急性期病床を対象として-，都市計画論文集，49(3)，987-992，2014．