

愛知県における輸送用血液製剤の最適輸送計画

2011SE073 今枝眞吾 2011SE096 伊藤友貴

指導教員：佐々木美裕

1 はじめに

日本赤十字血液事業では、全国 54 の血液センターと 185 の付属施設（病院や献血センターなど）および 1 つの本社直轄施設において運営され（平成 25 年 11 月 1 日時点）、全国の献血会場で献血された血液はブロック血液センターに届けられて血液製剤となり、各都道府県の血液センターから各医療機関へ届けられる。ブロック血液センターとは、全国に 7 つ配置されていて、配置されているブロックの各血液センターを統括する施設であり、愛知県は東海北陸地方に含まれ、愛知県瀬戸市南山口町 539 -3 にブロック血液センターが配置されている。血液センターから各医療機関に血液製剤を送ることはいいが、血液センターは地方ごとに 1 つしか配置されていないので、血液製剤の輸送に伴う人件費や輸送コストがかかる。そこで本研究では、愛知県血液センターから輸送される血液製剤の最適輸送計画を目指すことを課題とする。

ここで、[4][5] のモデルより出発地と目的地の間に中継地点としてハブを設置することで、最適輸送計画が可能である。本研究では血液センターと各医療機関へ輸送する間に中継地点を設置することで、血液製剤無駄な廃棄や様々なロス（輸送に伴う人件費や輸送コスト）を抑えることが出来ると考え、そして、需要点でもある医療機関で血液センターから近い地点を中継地点にすることで、より最適化が可能であると考えた。この中継地点をハブと設定し血液センターからハブ、ハブから需要点いわゆる各医療機関、それぞれの経路を設けることにより血液製剤をストックすることが可能となり、ハブからの緊急配送も可能となる。血液製剤の配送には、定期配送または緊急配送の 2 種類によって血液製剤の輸送は行われているが、ハブ（中継地点）に多くの血液製剤をストックさせておくことで血液センターからより遠い地域に輸送するときハブ（中継地点）から輸送することで賄うことが可能である。血液センターからハブ（中継地点）に輸送され、ハブ（中継地点）から医療機関に輸送されることで、高速道路を利用したり、人件費など輸送費などのコスト、血液製剤の廃棄率も軽減できるとわかる。また、本研究では各医療機関で手術に伴う輸血量が血液製剤の需要量と総手術件数が比例すると仮定し、需要量が多い医療機関をハブ（中継地点）とし血液製剤を必要とする各医療機関へ最適輸送を目指す。

2 愛知県内の現状

[2] の病院情報局から、DPC に参加している愛知県の医療機関のデータの収集をし、そのデータを基に愛知県内の DPC 病院と愛知県血液センターの地点を図 1 に示す。

DPC とは、入院患者の病名や症状をもとに手術や合併症

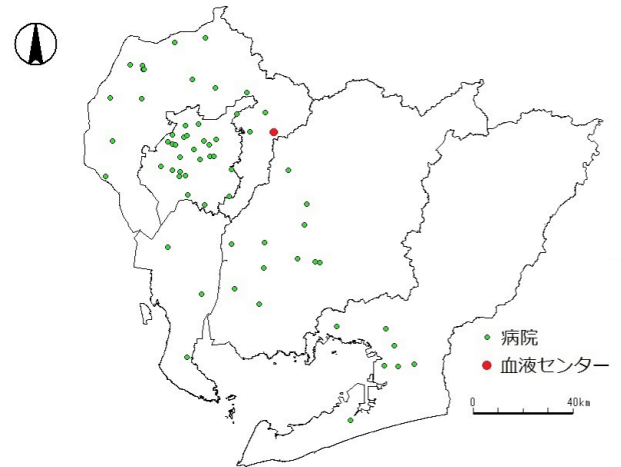


図 1 血液センターと各医療機関

の有無、処置の状況などに応じて、厚生労働省が定めた診断分類書ごとに決められた 1 日あたりの定額の医療費を基本として全体の医療費の計算を行う方式である。

全ての医療機関がこの DPC 方式で医療費が計算されているわけではなく、厚生労働省の定めた基準により長期にわたる入院や、労災保険、自賠責保険、正常分娩などの診療は対象とならない。DPC 方式によるメリットは、全国の DPC 参加病院との診療内容の比較が可能となり、治療が標準化され無駄な投薬や検査がなくなることである。反対に、デメリットは医療費が重度軽度に関係なく診療内容に応じて医療費がかかり、場合によっては以前の医療費よりも高くなってしまふことである。

この DPC 方式により、DPC 参加医療機関の情報が公開されるようになり、治療にあたる患者にも医療機関ごとの現状が出来るようになった。DPC 方式に参加する医療機関は、2004 年 4 月の時点で、DPC 方式の見直しを加え国立病院や民間病院を含めた計 62 棟となった。愛知県内の医療機関は、300 棟以上あるが、その内 DPC 方式に参加している病院が 62 棟しかない。DPC に参加する病院が更に増えていけば、所得格差によらず、定額であることによって、患者が病気や症状に対する目安が明確に把握でき、患者が病院に通いやすい環境が整っていき医療機関の評価もより正確になると考えられる。さらに DPC 方式に参加する医療機関がさらに増えると、正確なデータを得ることが出来、より効率に医療機関の体制を整えることが出来る。図 1 より、病院が特に名古屋市内に集中していることがわかる。しかし、知多半島や西三河地方、東三河地方を見てみると、医療機関の数が少ないことがわかる。特に、東三河地方に

表 1 愛知県内の総手術件数が多い順上位 10 件

順位	医療機関名	総手術件数
1.	藤田保健衛生大学病院	8738 件
2.	名古屋第二赤十字病院	7862 件
3.	名古屋大学医学部附属病院	7654 件
4.	名古屋第一赤十字病院	7381 件
5.	愛知医科大学病院	6997 件
6.	社会保険中京病院	6789 件
7.	安城更生病院	6626 件
8.	豊橋市民病院	5699 件
9.	刈谷豊田総合病院	5260 件
10.	豊田厚生病院	5166 件

※ 2012 年 4 月～2013 年 3 月退院患者の統計

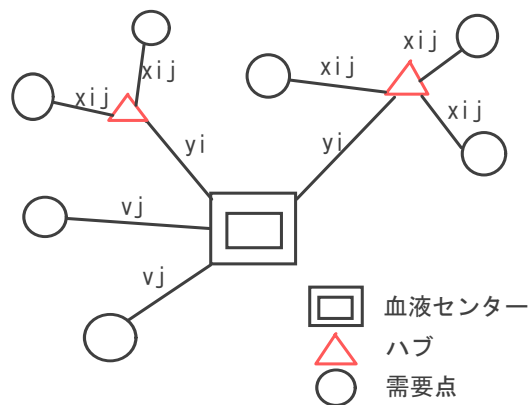


図 2 本研究の輸送図モデル

注目してみると、血液センターからの距離があるので、需要量が多い医療機関がハブに選択されることで、血液センターとハブ間に血液製剤を多く輸送することが可能となり輸送計画が効率的になるということが考えられる。

都市部ほど医療機関が集中していて、知多半島や西三河地方、東三河地方では需要量が多い医療機関は少数であり、需要量が少ない医療機関が多くある。以上のことから、需要量が多い医療機関はハブとなり需要量が少ない医療機関へ輸送するようなモデルを考える必要がある。そこで、需要量が多い順に降順で表を作成した。愛知県の医療機関において総手術件数が多い 10 棟を表 1 に示す。

3 モデルの説明

N 個の需要点 (ノード) を持つ愛知県において、 P 個の中継地点 (ハブ) と 1 個の血液センターが配置されていることを考える。各医療機関で手術に伴う輸血量が血液製剤の需要量と総手術件数が比例すると仮定し、ハブは血液センターへの中継の役割を果たし、需要量が多い医療機関を中継地点とするようなモデルを考える。血液センターから輸送された血液製剤はハブを中継し愛知県内の各医療機関へ輸送され、ハブは必ず 1 個は設置し、ハブにストックすることを考慮する為に各ハブにはハブの需要量の定数倍の容量制約を設けることとする。ハブに容量制約を設ける。さらに、血液センターの負担を減らす為に、血液センターからハブ間の経路と、血液センターから需要点間の直接輸送の経路の合計の本数を制限する制限も加える。このことは、血液センターからの輸送回数を減らすことも考えることが出来る。ここではハブが複数個設置されるとし、ハブをそれぞれ設置し、ハブの需要量の定数倍した場合をそれぞれ比較検証する。

この問題は、血液センターを中心とする階層型施設配置問題と近い問題である。ここで [4][5] との違いを明記する。ゲートウェイまたは、施設とローカルハブの 2 つの階層を持つ階層型施設配置モデルを定式化し、ローカルハブをゲートウェイの中継地点とし、ゲートウェイも地域外目

的地の中継地点とし、それぞれの中継地点を最適配置することで総費用最小化を目的としている。また、ゲートウェイとは地域外の目的地へ接続するこの地域における巨大なハブである。すべての利用者の目的地は、地域外にある同じ場所とし、それぞれの中継地点を最適配置することで総費用最小化を目的としている。また、ゲートウェイとは地域外の目的地へ接続され、この地域における巨大なハブである。

私たちの研究では、DPC 病院の実データ [2] をもとに各医療機関で手術に伴う輸血量が血液製剤の需要量と総手術件数が比例すると仮定し、血液センターから距離が近い医療機関をハブと選択されるようにし、最適なハブの配置を求め、総輸送距離の最小化を目的とする。

図 2 は、本研究のモデルを表す。

4 定式化

血液製剤を輸送する際に、血液センターとハブ間はハブと需要点間より大量輸送される。そのため、一般に単位あたりの輸送費用が安くなる。この割引率を容量制約と血液センターから出る輸送フローの枝の本数を制限することで表すことが出来る。さらに血液センターとハブ間の流量にハブの需要量以上となる容量制約を用いることで、割引率が掛からない直接輸送より、ハブ経由輸送が選択されやすくなる。血液センターから出る輸送フローの枝の本数の合計を制限することで、現実で計画可能な輸送計画を目指す。輸送費用は輸送距離に比例すると仮定し、輸送費用最小化の代わりに総輸送距離最小化を目的とする。ここで、次の記号を定義する。

- N : 需要点 (ノード) の添字集合.
- w_j : 需要点 $j \in J$ における需要.
- d_{ij} : 需要点 $j \in N$ とハブ $i \in N$ 間の距離.
- f_i : 血液センターからハブ $i \in N$ 間の距離.
- k_j : 血液センターから需要点 $j \in J$ 間の距離.
- a : 血液センターとハブ間の流量に対する容量制約の

定数.

q : 血液センターから出る輸送フローの枝の本数.

P : 選択するハブの数.

M : 総需要 ($\sum_{j \in N} w_j$).

決定変数は以下のとおりとする.

x_{ij} : 需要点 $j \in J$ とハブ $i \in N$ 間の流量.

y_i : 血液センターとハブ $i \in N$ 間の流量.

v_i : 血液センターと需要点 $j \in J$ 間の流量.

z_i : ノード $i \in N$ がハブに選択されたとき 1, そうでなければ 0 をとる変数.

h_i : 需要点 $j \in N$ に直接輸送するとき 1, そうでなければ 0 をとる変数.

最適輸送計画モデルは次のように定式化できる

$$\text{Min. } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in N} f_i y_i + \sum_{j \in N} k_j v_j \quad (4.1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in N} x_{ij} = y_i, \quad i \in N \quad (4.2)$$

$$x_{ij} \leq w_j z_i, \quad i, j \in N \quad (4.3)$$

$$y_i \leq M z_i, \quad i \in N \quad (4.4)$$

$$v_j \leq w_j h_j, \quad j \in N \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in N} z_i = P \quad (4.6)$$

$$\sum_{i \in N} z_i + \sum_{j \in N} h_j \leq q \quad (4.7)$$

$$v_j + \sum_{i \in N} x_{ij} \geq w_j, \quad j \in N \quad (4.8)$$

$$y_i \leq a w_i, \quad i \in N \quad (4.9)$$

$$z_j + h_j \leq 1, \quad j \in N \quad (4.10)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i, j \in N \quad (4.11)$$

$$y_i \geq 0, \quad i \in N \quad (4.12)$$

$$v_j \geq 0, \quad j \in N \quad (4.13)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad i \in N \quad (4.14)$$

$$h_j \in \{0, 1\}, \quad j \in N \quad (4.15)$$

目的 (4.1) は、血液製剤の総輸送距離の最小化を表し、目的関数の第 1 項はハブ i から需要点 j への輸送費用を表し、第 2 項は血液センターからハブ i への輸送費用を表し、第 3 項は血液センターから需要点 j への輸送費用を表している。制約 (4.2) は、ハブ i における流量保存則であり、ハブに流れる流量はハブから各需要点の総流量と等しいことを表す制約。制約 (4.3) は、ハブと流量の関係に関する制約であり、直接輸送にも関係する制約である。制約 (4.4) は、血液センターからハブ間の流量は各需要点の総需要量以下を表す制約である。制約 (4.5) は、直接輸送する際に需要量を満たす制約である。制約 (4.6) は、ハブを P 個配置することを表している。制約 (4.7) は、血液センターから出る輸送フローの本数を制限する制約である。制約 (4.8) は、直接輸送に関する制約条件である。制約 (4.9) は、容量制約を表す制約条件である。制約 (4.10) は、直接輸送とハブ経由輸送を分ける制約である。制約 (4.11)(4.12)(4.13) は、非負制約を表している。制約 (4.14)(4.15) は、バイナリ変数を表している。

図 2 は、本研究の輸送図モデルを表し、経路に対する変数

も表す。

5 計算実験

最適化計算には、IBM ILOG CPLEX12.5.1.0 を用いる。使用したコンピュータの CPU は Intel(R) Core(TM) i5 CPU、メモリは 2.0 GB である。実験をするにあたり血液センターから出る輸送フローの枝の本数の制限は 30 本とし、ハブ候補となる地点の需要量を定数倍する、 $a = 3, 4, 5$ とハブの設置個数が 5 個、7 個、10 個のそれぞれの場合を実験する。この実験には愛知県 DPC 病院の実データを用い、出発地と目的地までの距離はユークリッド距離を利用し、道路距離ではない。実データは [2] より、62 施設の DPC 病院を全て需要点または、ハブになりうる地点である。それぞれの地点は緯度、経度から X 座標、 Y 座標へと変換し、エクセルで需要量の多い順に並べられ、IBM ILOG CPLEX12.5.1.0 を用いデータを読み取り、血液センターからハブ、ハブから需要点のユークリッド距離計算を行っている。

5.1 実験結果と比較

ハブの設置個数 3 通り と 3 通りのハブ地点での需要量の定数倍 $a = 3, 4, 5$ 、血液センターから出る輸送フローの枝の合計の本数 $q = 30$ を用い、計 9 通りの実験を行った。表 2 がその結果である。目的関数値が 1 番小さな値を得た結果は、図 4 の $P = 10$ の $a = 5$ のときであったが他の条件の最適解と値に大きな差は見られなかった。

ハブ候補となる地点での需要量の容量制約の制限を増やしていくことで、総輸送距離の最小化をすることがより可能となり、2 つのハブから 1 つの需要点への輸送もされにくくなった。また、ハブの設置個数を増やすことで需要量が少ない小規模な医療機関がハブ候補と選択される結果が出たが、医療機関の規模を考えるとハブから需要点の流量がハブの需要量を超えているのでハブに需要量以上の血液製剤を保管しておくことが困難であると考えることが出来る。血液センターから距離が近く需要量が多い地点がハブ候補となる結果を得たことで、ハブの設置個数に関係なく距離が近く需要量が上位の地点はハブ候補に選択されやすいことが結果としてわかった。

ハブの設置個数 7 個 10 個の時、45. 八千代病院 9. 刈谷 豊田総合病院 11. 名古屋市立大学病院 51. 総合犬山中央病院以上の 4 地点に関しては、需要量と血液センターからの距離 2 つの条件がどちらか一方または、両方あまり上位ではなかったがハブ候補として選択されていた。図を確認してみると以上の 4 地点は周りに医療機関が多いまたは、都市部ではなく都市部から離れ需要点が周りに数個あるハブ候補であることがわかった。

ここで、図 3 と図 4 の 2 通りを比較してみると、目的関数値の値はさほど大きな差はないが、図 3 では 33. 藤田保健衛生大学 坂文種報徳會病院 と 38. 津島市民病院 に関してはハブ候補ではないが、2 つのハブ候補地点から 1 つの需要点に輸送される結果を得た。図 4 では、2 つのハブ候

表2 ハブ設置地点と総輸送距離の最小化 一覧

ハブ設置個数	定数 a	ハブ候補の番号	目的関数値
5	3	2, 5, 10, 20, 30	379372.87
	4	2, 5, 10, 30, 47	379237.64
	5	2, 5, 10, 33, 47	379199.02
7	3	2, 5, 10, 20, 30, 45, 47	379249.26
	4	2, 5, 10, 20, 30, 33, 47	379182.30
	5	2, 5, 10, 30, 33, 45, 47	379159.55
10	3	2, 5, 9, 10, 20, 30, 33, 45, 47, 51	379182.84
	4	2, 5, 9, 10, 11, 20, 30, 33, 47, 51	379132.63
	5	2, 5, 10, 11, 20, 30, 33, 45, 47, 51	379125.00

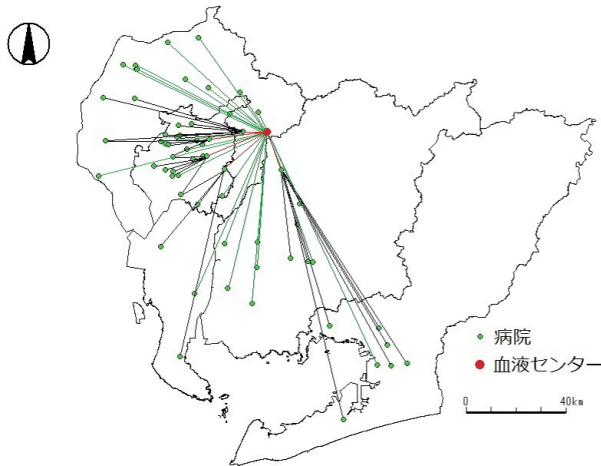


図3 $P = 5$ $a = 3$ の輸送図

補から1つの需要点に輸送される結果は得られなかった。このことから、容量制約が $a = 3$ のとき血液センターからハブ間の流量が少ないがためにこのような結果が得られたと考えられる。最適輸送計画を目指すため1つの需要点に2回輸送されないよう容量制約の調整、ハブの設置個数の調整、血液センターから出る輸送フローの枝の本数の制限をうまく調節する必要がある。

6 おわりに

本研究では、モデルを検討する際に血液センターとハブ間の輸送の際に大量輸送する為、血液センターとハブ間の割引率をどうモデルに組み込むかが重要であった。血液製剤を輸送するときには普通乗用車を利用し大量輸送は行はず、定期輸送または、緊急時の緊急輸送する2種類である。ここで、本研究ではハブにストックすることと、血液セ

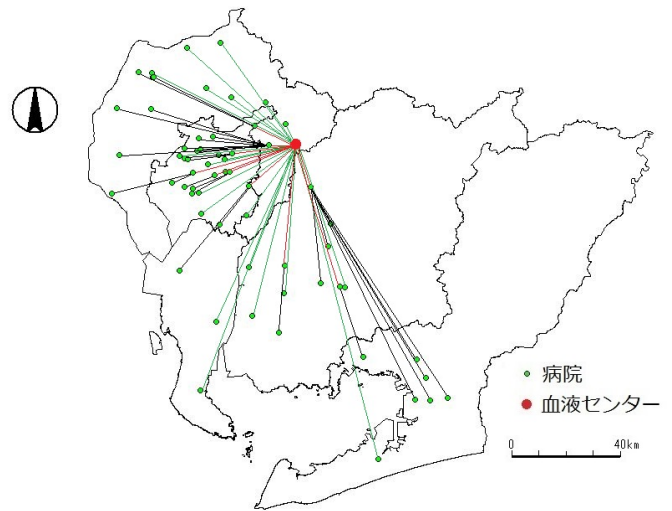


図4 $P = 10$ $a = 5$ の輸送図

ンターの負担を減らす為にハブ候補となる地点の需要量の定数倍を容量制約とし、さらに血液センターから出る輸送フローの枝の本数も制約に加え最適輸送計画を目指した。現実で可能な最適輸送計画を考えるのであればハブから需要点に輸送する際の条件(輸送回数や医療機関に血液輸送用の緊急自動車の配備など)を考慮する。さらに1つの需要点に2回輸送されない為に容量制約をより多く設定すること、ハブの設置個数の調整もしくは、血液センターから出る輸送フローの枝の本数の制限をうまく調節する必要がある。

参考文献

- [1] 日本赤十字社 : 赤十字血液センター <http://www.jrc.or.jp/>
- [2] 病院情報局 : DPC 全国統計 <http://hospia.jp/>.
- [3] 厚生労働省: <http://www.mhlw.go.jp/>.
- [4] 佐々木美裕, 古田壮宏, 鈴木敦夫: ゲートウェイ空港配置モデル, アカデミア数理情報編, Vol. 7, pp. 75-82, 2007.
- [5] 佐々木美裕, 古田壮宏, 鈴木敦夫: 階層構造を持つミニサム型施設配置問題の厳密解, アカデミア数理情報編, Vol. 6, pp. 69-76, 2006.