

血液製剤の最適輸送計画

～愛知県を例として～

2012SE116 小林義隆 2012SE147 松永大貴

指導教員：佐々木美裕

1 はじめに

血液事業は、全国 54 の血液センターと 188 の付属施設により運営している。この事業は、安全性の高い血液製剤の供給をするために行う「検査の提供」、献血により集めた血液を安全かつ有効な「血液製剤の製造」、血液製剤の適正な在庫管理、ブロック血液センター（都道府県単位で設置されている血液センターを全国 7 ブロックに分割し、統括を行う機関）から「各血液センターへの血液製剤の輸送」の 3 つのカテゴリーで構成されている。血液センターに送られた血液製剤は、各医療機関への「定期輸送」、24 時間体制の「緊急輸送」の 2 通りの方法で、輸送を行っている。現状、2 通りの輸送方法で血液製剤の輸送を行っているが、緊急輸送の際、距離の遠い医療機関への輸送に時間がかかる問題がある。献血をする人の大半が 50 歳以下であるのに対して、血液製剤の多くは高齢者の医療に使われている [1]。少子高齢化が進む中、血液製剤の需要がますます高まり、血液製剤の不足が予想される。さらに、血液製剤には使用期限があり、期限が短いものでは 1 週間以内のものも存在する。現状、定期輸送でストックしておいた血液製剤の使用期限が切れ廃棄することが多く、血液製剤の不足に拍車をかける結果となっている。各医療機関の血液製剤の需要の拡大に対応し、迅速に血液製剤を輸送できるようなネットワークを整備することが重要である。

本研究では、従来の血液製剤の輸送時間に比べ、時間を短縮するモデルを提案し、迅速に血液製剤を輸送できるネットワークを考える。

2 愛知県内の現状

愛知県では、瀬戸市の血液センターから各医療機関へ血液製剤の輸送を行っている。本研究では、愛知県内の DPC に参加している病院を対象に実験を行う。

DPC（包括医療費支払い制度方式）とは、入院期間中に治療した病気の中で最も医療資源を投入した一疾患のみに厚生労働省が定めた 1 日あたりの定額の点数からなる包括評価部分（入院基本料、検査、注射、画像診断等）と、従来どおりの出来高評価部分（手術、胃カメラ、リハビリ等）を組み合わせて計算する医療費支払い制度のことである。愛知県では、62 棟の病院が DPC に参加、参加準備をしている。病院情報局 [1] から、DPC に参加している愛知県の医療機関のデータを収集し、そのデータを基に愛知県内の血液センターと DPC 参加病院の所在地を図 1 に示す。

今枝・伊藤 [2] は、血液センターのほかに医療機関をいくつか選び、拠点病院とし、血液センターと同様に血液製剤の保管、各医療機関への輸送の役割を持たせるモデルを考

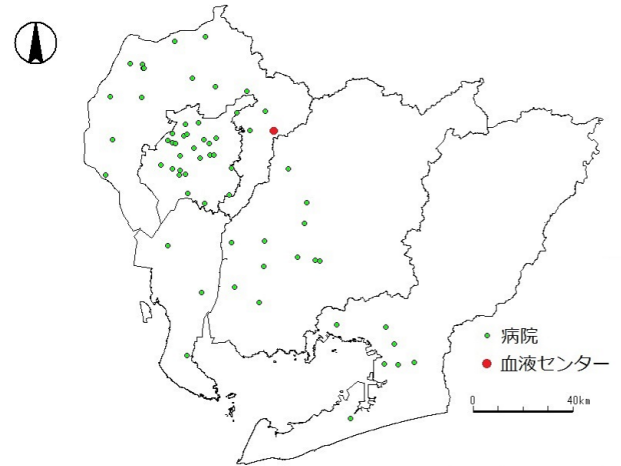


図 1 血液センターと DPC 参加病院の所在地

えた。この研究では、総輸送距離の最小化を目的として解を求めた。図 2 は、今枝・伊藤 [2] の輸送ネットワークを示している。

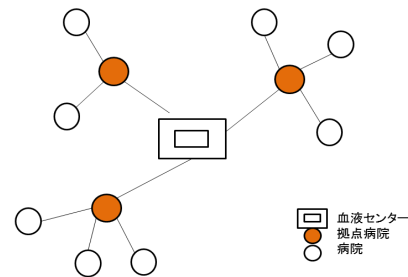


図 2 今枝・伊藤 [2] の輸送ネットワーク

この輸送ネットワークでは、血液センターから各拠点病院へ血液製剤を輸送し、拠点病院で血液製剤の保管を行う。そして、医療機関から緊急輸送の要請があるごとに血液製剤の輸送を行う。実験の結果、輸送距離を短くすることができ、現状に比べて輸送時間を改善することができた。しかし、今枝・伊藤 [2] は、拠点病院から各医療機関への輸送距離が長い医療機関が存在している点、血液製剤の保管、輸送を行うことが拠点病院の負担になると仮定し、拠点病院間の負担に差が生じている点を課題として挙げている。また、血液センターから各拠点病院への血液製剤の輸送は、1 対 1 で行われるため、人件費や輸送コストを考えると現実的な輸送ネットワークとは言えない。今枝・伊藤 [2] が課題として挙げた、拠点病院と医療機関の輸送距離の改善、血

液製剤の保管、輸送に伴う負担の偏りの軽減、現実的な輸送ネットワークを求め、従来からの輸送方法の問題を改善するモデルを考えることにする。

本研究では、今枝・伊藤 [2] と同様に DPC 参加病院の中からいくつかの病院を選び、拠点病院とし、血液センターと同様に血液製剤の保管、輸送の役割を持たせることを考える。血液製剤の輸送距離の上限、拠点病院の負担の上限を設定し、血液製剤の総輸送距離を最小にする拠点病院を決定するモデル、血液製剤の輸送距離の上限を設定し、拠点病院の負担の平均値と実際に負担する値の差を最小にする拠点病院を決定するモデルの 2 つを提案する。さらに、両モデルとも拠点病院の決定後、巡回路を求め、血液センターから各拠点病院へ直接輸送する方法に比べて、人件費、輸送コストを考慮した現実的な輸送ネットワークを求め。

3 モデルの説明

3.1 総輸送距離の最小化モデル

血液センターから各拠点病院へ定期輸送で血液製剤を輸送し、医療機関から緊急輸送の要請があった際、拠点病院から医療機関へ緊急輸送する輸送ネットワークを考える。 n 個の医療機関を持つ地域において、 p 個の拠点病院を決定するモデルを考える。各医療機関における総手術件数と、血液製剤の需要量が比例すると仮定し、拠点病院は血液センターと同様に、血液製剤の保管、各医療機関への輸送の役割を持つと仮定する。拠点病院の設置数、拠点病院と医療機関の距離の上限、血液製剤の保管、輸送の負担の上限を設定し総輸送距離が最小になる拠点病院を決定する。今枝・伊藤 [2] は、総輸送距離の最小化を目的として問題を解いているが、本研究では、拠点病院と医療機関の輸送距離の上限、拠点病院の負担の上限を設定し、総輸送距離を最小化することを目的とする。これにより、各拠点病院の負担の偏りを小さくすることができ、距離が遠い病院への輸送を避けることができると考えられる。また、本研究では、血液センターを出発点とし、すべての拠点病院を結ぶ巡回路を求めることにより、経路の最適化も行う。図 3 は、本研究の輸送ネットワークを示す。

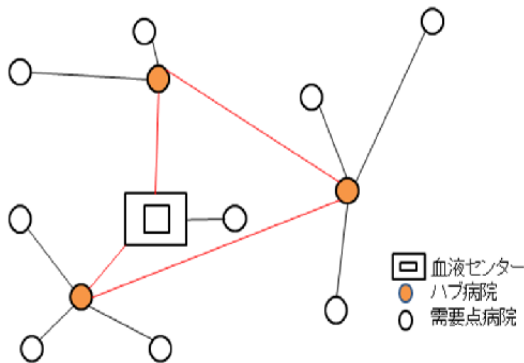


図 3 本研究の輸送ネットワーク

3.2 負担の差の最小化モデル

総輸送距離の最小化モデルと同様の輸送ネットワークを考える。ただし、総輸送距離の最小化モデルでは、総輸送距離を最小にする拠点病院の決定を行ったが、このモデルでは、拠点病院の負担の差を最小にする拠点病院の決定を行う。拠点病院の設置数、輸送距離の上限を定め、拠点病院の負担の平均値と実際に拠点病院が負担する値の差を最小にする拠点病院の決定を考える。医療機関は必ず 1 つの拠点病院から血液製剤の輸送を受けるものとする。総輸送距離の最小化モデルと同様に、拠点病院を決定した後、血液センターをスタート地点とし、すべての拠点病院を結ぶ巡回路を考える。

4 定式化

4.1 記号の定義

総輸送距離の最小化モデルと負担の差の最小化モデルを提案する。ここで、次の記号を定義する。

N : 愛知県内の DPC 参加病院の集合

p : 選択する拠点病院の数

L : 拠点病院から医療機関へ血液製剤を輸送する際の距離の上限

a : 拠点病院の負担制約の上限を決定する定数

w_i : 病院 $i \in N$ の需要量

d_{ij} : 病院 $i \in N$ から 拠点病院 $j \in N$ への距離

A : 選択される拠点病院が負担する血液製剤の需要量の平均値, $A = \sum_{i \in N} \frac{w_i}{p}$

決定変数は以下の通りである。

y_j : 拠点病院 $j \in N$ を配置するとき 1, 配置しないとき 0 をとる 0-1 変数

x_{ij} : 病院 $i \in N$ が, 拠点病院 $j \in N$ から血液製剤を輸送するとき 1, そうでないとき 0 をとる 0-1 変数

4.2 総輸送距離の最小化モデルの定式化

$$\min. \quad \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N} y_j = p, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \quad i \in N \quad (3)$$

$$x_{ij} + y_i + y_j \leq 2, \quad i \in N, j \in N \quad (4)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \quad i \in N, j \in N \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} w_i x_{ij} \leq Aa, \quad j \in N \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N} d_{ij} x_{ij} \leq L, \quad i \in N \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \in N, j \in N \quad (8)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad j \in N \quad (9)$$

目的関数 (1) は、拠点病院 $j \in N$ から病院 $i \in N$ へ血液製剤を輸送するときの総輸送距離の最小化を表している。(2) 式は、 p 個の拠点病院を選択することを表している。(3) 式は、病院 $i \in N$ がいずれかの拠点病院 $j \in N$ から血液製剤の輸送を受けることを表している。(4) 式は、病院 $i \in N$ と病院 $j \in N$ が拠点病院に選ばれたとき、拠点病院間で血液製剤の輸送を行わないことを表している。(5) 式は、病院 $j \in N$ が拠点病院に選択されなければ、血液製剤の輸送を行わないことを表している。(6) 式は、拠点病院 $j \in N$ から病院 $i \in N$ へ血液製剤を輸送するとき、拠点病院の負担が負担の平均値の a 倍以下であることを表している。(7) 式は、拠点病院 $j \in N$ から病院 $i \in N$ へ血液製剤を輸送するとき、輸送距離が L 以下であることを表している。(8) 式は、拠点病院 $i \in N$ から病院 $j \in N$ に血液製剤が輸送されるとき 1、輸送されないとき 0 をとる 0-1 変数であることを表している。(9) 式は、 $i \in N$ を拠点病院に選択するとき 1、拠点病院に選択しないとき 0 をとる 0-1 変数であることを表している。

4.3 負担の差の最小化モデルの定式化

ここで新たに記号を定義する。

h_j : 負担の平均値と拠点病院 $j \in N$ が負担する値の差

$$\min. \quad \sum_{j \in N} h_j \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N} y_j = p, \quad (11)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \quad i \in N \quad (12)$$

$$x_{ij} + y_i + y_j \leq 2, \quad i \in N, j \in N \quad (13)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \quad i \in N, j \in N \quad (14)$$

$$\sum_{j \in N} d_{ij} x_{ij} \leq L, \quad i \in N \quad (15)$$

$$A - \sum_{i \in N} w_i x_{ij} \leq h_j, \quad j \in N \quad (16)$$

$$\sum_{i \in N} w_i x_{ij} - A \leq h_j, \quad j \in N \quad (17)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \in N, j \in N \quad (18)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad j \in N \quad (19)$$

共通する制約条件 (11), (12), (13), (14), (15), (18), (19) の説明は省略する。(10), (16), (17) は、拠点病院の負担の平均値と拠点病院が負担する値の差の最小化を表している。

4.4 拠点病院の巡回路を求める定式化

ここで新たに記号を定義する。

K : 拠点病院と血液センターの集合

z_{ij} : 拠点病院または血液センター $i \in K$ から拠点病院または血液センター $j \in K$ へ輸送するなら 1、輸送しないなら 0 をとる 0-1 変数

$$\min. \quad \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} d_{ij} z_{ij} \quad (20)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in K} z_{ij} = 1, \quad i \in K \quad (21)$$

$$\sum_{i \in K} z_{ij} = 1, \quad j \in K \quad (22)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \in K, j \in K \quad (23)$$

$$u_i - u_j + |K| z_{ij} \leq |K| - 1 \\ i = 2, \dots, |K| - 1, j = 2, \dots, |K| \quad (24)$$

(20) は、拠点病院または血液センター $i \in K$ から拠点病院または血液センター $j \in K$ までの、巡回路の距離を最小化することを表している。(21) は、拠点病院 $i \in K$ を出発する回数は 1 回であることを表している。(22) は、拠点病院 $j \in K$ に到着する回数は 1 回であることを表している。(23) は、拠点病院または血液センター $i \in K$ から拠点病院または血液センター $j \in K$ への輸送するとき 1、輸送しないとき 0 をとる 0-1 変数であることを表している。(24) は、部分巡回路除去制約である。

5 計算実験

5.1 実験に用いたデータ

最適化計算には、IBM ILOG CPLEX Optimization Studio version.12.5.1.0 を用いる。使用したコンピュータの CPU は、Intel(R) Core(TM) i5-2520M CPU、実装メモリ 4GB である。病院の実データは、伊藤・今枝 [2] の研究で用いた、病院情報局 [1]62 の DPC 参加・準備病院のデータを使用する。従来の血液製剤の直接輸送における距離の最大値は渥美病院の 61.27、各医療機関と血液センターの距離の合計は 1339.88 である。

5.2 総輸送距離の最小化モデル

総輸送距離を最小にする拠点病院の決定を行う問題において、 $p = 3, 5, 7$ の場合を考える。このとき、拠点病院から医療機関へ血液製剤を輸送するときの距離の上限 L を、 $20 \leq L \leq 40$ で変化させる。また、各拠点病院が負担する血液製剤の需要量の上限を、 $a = 1.2$ 、すなわち総需要量を p で割った平均値の 1.2 倍以下として実験を行う。表 1 は、実験した際の拠点病院数、輸送距離の上限 L 、輸送距離の最大値、拠点病院間の負担の差、総輸送距離を示している。

拠点病院から医療機関へ血液製剤を輸送するときの距離の上限 L を小さくするほど、総輸送距離は大きくなるが、拠点病院から各医療機関への血液製剤の輸送距離を小さくすることができた。拠点病院が負担する需要量の差は大きくなる結果となった。また、 L の値が大きいほど、近い拠点病院があるにも関わらず、遠い拠点病院から血液製剤の輸送を受ける医療機関が多く存在する結果となった。拠点病院数 p を大きくすると、拠点病院から各医療機関への血液

製剤の輸送距離を小さくすることができ、各拠点病院が負担する血液製剤の需要量の差を小さくすることができた。

表 1 総輸送距離の最小化モデル

p	L	輸送距離の最大値	負担の差	総輸送距離
3	28	27.35	32915	838.37
	30	28.42	34729	786.49
	40	34.78	21346	696.53
5	20	19.42	27317	521.12
	25	24.03	27778	481.32
7	20	17.04	15671	383.77
	25	24.03	15432	380.53

5.3 負担の差の最小化モデル

医療機関の血液製剤の需要量の合計を p で割った平均値と、実際に各拠点病院が負担する血液製剤の需要量の差を最小にする拠点病院を決定する問題において、総輸送距離の最小化モデルと同様の条件で実験を行う。表 2 は、実験した際の拠点病院数、輸送距離の上限 L 、輸送距離の最大値、拠点病院間の負担の差、総輸送距離を示している。

拠点病院から医療機関へ血液製剤を輸送するときの距離の上限 L を小さくするほど、総輸送距離は小さくなるが、拠点病院が負担する需要量の差は大きくなる結果となった。 L の値が大きいほど、拠点病院が負担する需要量の差は小さくすることができるが、距離が遠い拠点病院から血液製剤の輸送を受ける医療機関が多く存在する結果となった。拠点病院数 p を大きくすると、拠点病院から各医療機関への血液製剤の輸送距離を小さくすることができ、各拠点病院が負担する血液製剤の需要量の差を小さくすることができた。

表 2 負担の差の最小化モデルの結果

p	L	輸送距離の最大値	負担の差	総輸送距離
3	28	27.88	30671	1072.49
	30	29.35	27497	1028.89
	40	39.92	250	1636.27
5	20	19.62	32330	711.80
	25	24.79	6883	840.87
7	20	19.71	318	694.67
	25	23.86	125	850.92

5.4 考察

図 4、図 5 は、 $p = 7, L = 25$ のときの両モデルの輸送ネットワークを表している。総輸送距離の最小化モデルでは、拠点病院の負担の差は 15432 であり、多少のばらつきが生じたが、総輸送距離が 380.53 となり、輸送時間を短縮することができた。負担の差の最小化モデルでは、拠点病院の負担の差は 125 となり、ばらつきを小さくすることができた。しかし、図 5 を見ると、都市部で距離の遠い病院から血液製剤の輸送を受ける医療機関が見られた。両モデルとも、従来の輸送方法と比べ、輸送距離を改善することが

でき、負担のばらつきを抑えることができた。総輸送距離の最小化モデルのメリットは、血液製剤の総輸送距離を小さくできることである。ただし、各拠点病院が負担する血液製剤の需要量の下限、上限を設定するのが難しく、各拠点病院が負担する血液製剤の需要量にばらつきが生じてしまうデメリットがある。負担の差の最小化モデルのメリットは、各拠点病院が負担する血液製剤の需要量を均一に近づけることができることである。ただし、負担する血液製剤の需要量を均一に近づけることを目的としているため、近い拠点病院があるにもかかわらず、距離の離れた拠点病院から血液製剤の輸送を受けるデメリットがある。総輸送距離の最小化モデル、負担の差の最小化モデルはともに血液製剤の輸送距離と負担する血液製剤の需要量の間に相関関係があることがわかった。

両モデルとも、従来の輸送方法と比較すると、拠点病院と医療機関の輸送距離の改善、血液製剤の保管、輸送に伴う負担の偏りの軽減を達成することができた。結果より、拠点病院数を増やすことによって、より最適な輸送ネットワークになると考えた。

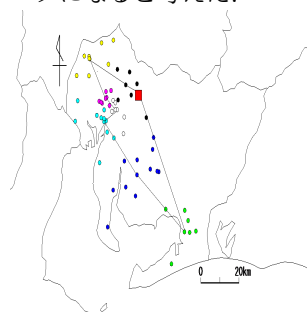


図 4 総輸送距離の最小化
 $p = 7, L = 25$ の場合

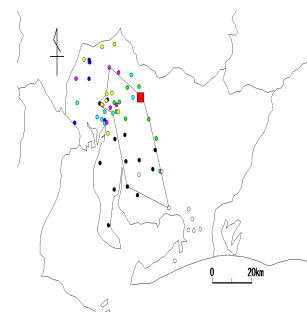


図 5 負担の差の最小化
 $p = 7, L = 25$ の場合

6 おわりに

本研究では、総輸送距離の最小化モデル、負担の差の最小化モデルの 2 つを提案した。従来の血液センターから各医療機関へ直接血液製剤を輸送する方法と比較して、両モデルとも血液製剤の輸送距離の削減、拠点病院が負担する血液製剤の需要量の均等化をすることができた。

今後の課題として、パレート最適を行うことが考えられる。また、医療機関が血液製剤の輸送を受ける拠点病院の数を 1 つに限らず、複数の拠点病院から受け取れるモデルが考えられる。

参考文献

- [1] 病院情報局 : <http://hosopia.jp/>
- [2] 今枝真吾, 伊藤友貴 : 「愛知県における輸送用血液製剤の最適輸送計画」, 南山大学 情報理工学部 2014 年度卒業論文, 2015.
- [3] 厚生労働省 : <http://www.mhlw.go.jp/>
- [4] 日本赤十字社 : <http://www.jrc.or.jp/>