

## 一般分布に従う要求処理配分問題

大阪府立大学 寺岡義伸 (Yoshinobu Teraoka)

大阪府立大学 北條仁志 (Hitoshi Hohjo)

Department of Mathematics and Information Sciences,  
Osaka Prefecture University

### 1 はじめに

約7年前から施設配置問題に興味を持ち始め、Dreznerの書物[3]を初めとし多くの文献を集め、自分なりにいくつかの問題を発見し論文として発表もしてきた。ところが、これらの理論を例えばスーパーマーケットの店舗拡張、ゴミ処理場や下水処理場の設備、都市を通過する自動車の為の道路、新空港、…といったような現実の配置問題に適用しようとなると、1つの指標にはなるが、ほとんど役に立たないことを経験する。この種の問題を扱うにあたってまず前提となる仮定は人は距離の短い位置にある施設を望む。しかし迷惑施設にあってはできるだけ離れた位置であってほしい。安い値段で品物を購入できる店へ集中するといったことであろう。1929年のHotellingのモデルがその出発点になったことも有名である[4]。実際下水処理場をどこに配置するかといえば、民家から離れ、広い土地があり、河川の側の低い土地というのがその候補であり、多くの場合はほぼ唯一に決まってしまう。スーパーマーケットの新店舗にしても広い駐車場が確保でき、近くに大きな幹線道路がありと、近い距離の店を客は選択するといった原則はくずれてしまい、これも諸種の物理的条件よりほぼ唯一に決まってしまう。あとは土地を確保するための経済的条件やそのほか諸々の政治的条件がこの手の決定問題を複雑にするだけである。

こうやって考えていくと最適配置の数値計画とは、案外に役に立たない分野であることがわかってくる。さらにバブル崩壊に端を発した日本経済の不況は、それまで計画中であった新空港や幹線道路の建設にも疑問を投げかけ、益々新施設配置の計画理論を重要性のない分野へ追いやってしまったと考えるのは、著者達の偏見であろうか。

以上のような考察のもとに、我々は既存の設備の中で目的にかなった設備を選び出し、発生する諸々の要求に対してどのように結びつけ組み合わせるのがシステム全体としての効率を高めることになるのかという観点から個々の問題を取り上げていく。

ここで扱う問題は、次の例から示唆される問題である。日本国内にはかなりの数の国際空港がある。しかし国際空港を持たない大都市の中にはこの事態を不満に思い、新空港の設置を望み、色々と運動しているようであるが、バブル崩壊後の昨今、このような運動には批判の声があたっている。そこで、ここでは日本国内の空港を全部まとめて1つの空港と考え、各空港をその空港内の1つの滑走路とみなし、世界中の各空港からある確率法則に従って到来する飛行機をどのような規準にもとづいて各空港へ割り当て着陸させるかといった問題を提案する。

### 2 モデル

ある地域に $m$ 個の需要や要求を発生する地点と $n$ 個の発生した需要や要求を処理する地点が散在している。ここでは、前者を需要点と呼び、後者を施設と呼ぶことにする。需要点と施設はこの地域内の固定された点であるとする。需要点 $i$ では、ある確率過程に従って単位時間当たり平均 $r_i$ 個の要求が発生する。この需要は全需要点に対して共通の種目に対しての要求となっており、発生の仕方は各需要点に関して独立で

あるものとする ( $i = 1, \dots, m$ )。我々 (行動決定者) は各需要点で発生した要求を処理するため、施設  $j$  へ送る ( $j = 1, \dots, n$ )。需要点  $i$  から施設  $j$  へ要求を送るに際しては  $d_{ij}$  の時間がかかるものとする。また施設  $j$  では送られてきた各要求を処理するのにやはりある確率法則に従って  $W_j$  の待ち時間と  $S_j$  の処理時間が必要となる。

ここで我々の問題は、需要点  $i$  で発生する rate  $r_i$  の要求を  $n$  個の施設の各々にどのように割り当てれば、最も効率良く、すなわち最短時間で処理できるかということである。需要点  $i$  で発生した要求をどの割合で施設  $j$  へ送るかを考える。そこで、

$x_{ij}$  = 需要点  $i$  で rate  $r_i$  のある確率過程 (計数過程) に従って発生した要求のうち  
施設  $j$  へ配分される rate

とすると

$$r_i = x_{i1} + \dots + x_{in}, \quad x_{i1} \geq 0, \dots, x_{in} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m$$

を満足する  $x_{ij}$  を決定することが我々の問題となる。そうすると施設  $j$  では

$$x_j = x_{1j} + \dots + x_{mj}, \quad j = 1, \dots, n$$

を到着率とするある確率過程 (計数過程) に従うことになり、各  $j$  での処理時間もまたある確率分布に従うので、要求が発生してから処理を開始するまでの平均所要時間、各  $j$  での平均処理時間、および需要点から施設への移動時間が我々の評価時間ということになる。目的は、このシステム全体で逐次発生する要求をその発生から処理完了までの期待時間を最小にするように配分  $x_{ij} \geq 0$ 、ただし、 $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$  を決定することである。

### 3 一般的定式化

あるシステム内で複数の要求が発生し、これらの要求を複数の施設で処理しようとする場合、システム全体としての処理完了までの時間を最小にするとは、要求の発生地点から処理の施設までの移動時間を含め、待ち時間と処理時間の総和が最も長くなりそうな需要点と施設の連結を最小時間で完了できるように要求の配分を割り当てることに他ならない。そう考えると我々のモデルは下記のように定式化できる。

$W_j$  = 施設  $j$  での待ち時間を示す確率変数

$S_j$  = 施設  $j$  での処理時間を示す確率変数

$d_{ij}$  = 需要点  $i$  から施設  $j$  への移動時間

とすると

$$\min_X \max_{i,j} \{E(W_j + S_j) + u(x_{ij})d_{ij}\}$$

ここに、 $E(Z)$  は確率変数  $Z$  の期待値を意味し、 $u(\cdot)$  は

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$$

であり、また  $X$  は制約条件を満足する  $mn$  組の配分  $x_{ij} \geq 0$  全体の集合である ( $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$ )。制約条件は要求の発生に関しての確率過程と処理に対しての確率分布に応じて適当に付与されるであろうが、現時点のモデルに対しては

$$\begin{aligned} x_{1j} + \dots + x_{mj} &= x_j, & j &= 1, \dots, n \\ x_{i1} + \dots + x_{in} &= r_i, & i &= 1, \dots, m \\ x_{ij} &\geq 0, & i &= 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

のみである。そして  $x_j$  は配分  $x_{ij}$  によって定められる。

一般にこの種の問題にあつては、 $E(W_j + S_j)$  は施設  $j$  へ割り当てられる要求の総和、すなわち  $x_j$  の増加関数として表現できると仮定しても不自然ではない。そこで、我々は

$$h_j(x_j) = E(W_j + S_j)$$

とおき、 $h_j(x_j)$  は  $x_j$  につき厳密に単調増加と仮定する。また施設  $j$  には窓口が複数であっても  $h_j(x_j)$  の具体的な形が変化するのみで  $x_j$  についての増加関数と仮定しても何ら問題が生じない。さらに多くの場合、需要点や施設における要求の定常的な流れ等の条件が加えられるため

$$x_{1j} + \cdots + x_{mj} = x_j < \lambda_j$$

も仮定する。そして後の議論のため

$$R = r_1 + \cdots + r_m ; \quad M = \lambda_1 + \cdots + \lambda_n$$

とおくと

$$R < M$$

が成立する。以上の仮定と条件の下で我々の問題をまとめると、次のような数理計画問題を得ることができる。

$$\min_{x_{ij}} \max_{i,j} [h_i(x_i) + u(x_{ij})d_{ij}] \quad (A)$$

subject to

$$x_{i1} + \cdots + x_{in} = r_i,$$

$$x_{1j} + \cdots + x_{mj} = x_j < \lambda_j,$$

$$x_{ij} \geq 0,$$

$$i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n,$$

ここに

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0. \end{cases}$$

これは、非線形の min max 型数理計画問題であり、一般的取り扱い是非常に難しい。

次に、需要点  $i$  での要求の発生が rate  $r_i$  のポアソン過程に従い、施設  $j$  での処理が rate  $\lambda_j$  の指数分布に従う場合に於てはめると（窓口が1つ）

$$E(W_j) = \frac{x_j}{\lambda_j(\lambda_j - x_j)}, \quad E(S_j) = \frac{1}{\lambda_j}$$

であるから

$$h_j(x_j) = \frac{1}{\lambda_j - x_j}$$

が得られ、 $x_j < \lambda_j$  はトラフィック条件ということになる。また施設  $j$  での窓口が2つのときは M/M/2 待ち行列の理論から

$$E(W_j) = \frac{x_j^2}{\lambda_j(2\lambda_j + x_j)(2\lambda_j - x_j)}, \quad E(S_j) = \frac{1}{\lambda_j}$$

より

$$h_j(x_j) = \frac{1}{2\lambda_j + x_j} + \frac{1}{2\lambda_j - x_j}$$

## 4 移動時間が一定のとき

この問題への出発点として需要点から施設への移動時間がそれらの位置関係とは無関係に与えられる場合、すなわち

$$d_{ij} = d, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n$$

となっている場合を考察する。電話回線を利用した情報ネットワークや日本近辺へ到来した航空機と空港の関係等は、このように仮定しても自然さを失わない。この場合、問題(A)の目的関数は

$$\min_{x_{ij}} \max_{i,j} [h_j(x_j) + u(x_{ij})d] = \min_{x_j} \max_j [h_j(x_j)] + d \quad (1)$$

となり、 $x_j$ を決定する問題に転化される。 $h_j(x_j)$ は $x_j$ につき狭義単調増加を仮定していたので

$$h_1(x_1) = \dots = h_n(x_n) = t \quad (2)$$

とおき、 $h_j(x_j) = t$ の逆関数を $x_j = h_j^{-1}(t)$ とおくと

$$h_1^{-1}(t) + \dots + h_n^{-1}(t) = R \quad (3)$$

を満たす $t$ が唯一存在する。この $t$ を $t^*$ とおき、

$$x_j^* = h_j^{-1}(t^*)$$

とおくと

$$\min_{x_j} \max_j [h_j(x_j)] = h_j(x_j^*) = t^* \quad (4)$$

を得る。このとき

$$h_j(x_j^*) = t^* \quad \text{for all } j \quad (5)$$

であり、

$$x_1^* + \dots + x_n^* = R \quad (6)$$

である。

さて、(3)によって $t^*$ が定まり、したがって $x_1^*, \dots, x_n^*$ が求まると、需要点 $i$ から施設 $j$ への配分 $x_{ij}$ は

$$x_{i1} + \dots + x_{in} = r_i, \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_{1j} + \dots + x_{mj} = x_j^*, \quad j = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n$$

を満足しなければならないから、需要点から施設への単位当たりの輸送費用が一定の輸送問題を解くことにより得られることになる。この解は無数に存在するが、北西隅法による解が簡便な解法といえよう。

## 5 移動時間が一般の場合

ここでは、各需要点から各施設への移動時間が相互の位置関係によって異なる一般的な場合を考察する。この場合、問題(A)の目的関数は

$$\min_{x_{ij}} \max_{i,j} [h_j(x_j) + u(x_{ij})d_{ij}] = \min_{x_{ij}} \max_j [h_j(x_j) + \max_i u(x_{ij})d_{ij}]$$

となる。そうすると、もし適当な  $x_j$  が定まったとすると、我々の問題は

$$\min_{x_{ij}} \{ \max_i u(x_{ij}) d_{ij} \} \quad (7)$$

subject to

$$x_{1j} + \cdots + x_{mj} = x_j,$$

$$x_{ij} \geq 0,$$

$$i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$$

を満足するような“需要点  $i$  から施設  $j$  への最大移動時間を最小にするような経路を見つけ出す問題”に転化される。この最短時間経路はすべての  $j = 1, \dots, n$  に対して見つけれなければならないから、このような経路は輸送問題

$$\min_{x_{ij}} \left\{ \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m d_{ij} x_{ij} \right\} \quad (S)$$

subject to

$$x_{i1} + \cdots + x_{in} = r_i, \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_{1j} + \cdots + x_{mj} = x_j, \quad j = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$$

を解くことによって得られる。さらに問題 (S) の解は、施設  $j$  へ配分される要求の総量が定まったと仮定した場合の、需要点  $i$  から施設  $j$  への最適配分量  $x_{ij}$  をも与えてくれることになる。

そうすると我々にとって残された問題は、求められた  $h_j(x_j)$  に対応する問題 (A) を満足する適当な  $x_j$  を定めることとなる。ここで後の議論のため、需要点全体の集合を  $D$  で、施設全体の集合を  $F$  で、すなわち

$$D = \{1, \dots, m\}; F = \{1, \dots, n\}$$

で表し、 $D$  の中で  $j \in F$  への配分を行う需要点全体の集合を  $D_j$ 、i.e.、

$$D_j = \{i \mid x_{ij} > 0\}, \quad j = 1, \dots, n$$

で表すこととする。 $x_j$  が定まると輸送問題 (S) により配分  $x_{ij}$  が定まるのでこの記号の導入は便利である。そうすると

$$x_j = \sum_{i \in D_j} x_{ij}, \quad j = 1, \dots, n$$

となる。さらに実行可能な  $D_j$  に対して

$$\begin{aligned} d_j &= \max_{i \in D_j} d_{ij} \\ &= \max_i u(x_{ij}) d_{ij}, \quad j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

すなわち、施設  $j$  へ要求を配分する需要点の中で最長となる距離  $d_j$  を定義する。ところで、 $k \neq l$  に対して  $D_k \cap D_l = \phi$  になるとは限らない。

こうすると問題 (A) は

$$\min_{x_j} \max_j [h_j(x_j) + d_j] \quad (T)$$

subject to

$$x_1 + \cdots + x_n = \sum_{i=1}^m r_i = R,$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

と変形できる。ただし

$$\begin{aligned} \sum_{i \in D_j} x_{ij} &= x_j, \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &= r_i, \\ x_{ij} &\geq 0, \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

である。

問題 (T) を観察すると、目的関数は  $d_j$  を固定すると  $x_j$  につき増加関数となっており、また  $d_j$  は  $x_j$  が定まると、輸送問題 (S) により可能な限り小さく決定されることがわかる。今もし適当な  $x_j^*$  と  $d_j^*$  が選べて

$$h_1(x_1^*) + d_1^* = h_2(x_2^*) + d_2^* = \dots = h_n(x_n^*) + d_n^*$$

が成立したとすると、この  $x_j^*$  が最適解を与えてくれることになる。しかしながら  $x_j$  を増加すると  $\sum x_{ij} = x_j$  であるから  $x_{ij} > 0$  となる  $i$  の数も増加し、そのため  $x_{ij}$  に対応する  $d_{ij}$  も大きな値へ離散的に変化し、結果として  $d_j$  が離散的に大きな値へ跳ぶ可能性が生じてくる。 $x_j$  を減少させると同様に  $d_j$  がより小さな値の  $d_{ij}$  の選択への移行に伴い、減少する可能性も出てくる。そうすると  $\sum x_j = R$  であるから別の  $x_j$ 、i.e.  $x_i$  が増加し、 $d_i$  も大きな値へ離散的に変化する可能性が生ずる。

以上の考察のもとに、最適解は、まず適当な  $x_j$  の初期値  $x_j^0$  を求め、問題 (S) と問題 (T) の部分問題:  $h_j(x_j) + d_j = \text{一定}$  を交互に反復することにより求めることができる。

## 6 簡単な例

ここでは、簡単な例として需要点  $i$  での要求の発生が rate  $r_i$  のポアソン過程に従い、施設  $j$  での処理が rate  $\lambda_j$  の指数分布に従う場合を扱う。

施設  $j$  での窓口の数が 1 つの場合

$$h_j(x_j) = \frac{1}{\lambda_j - x_j}$$

であるから、移動時間が一定の場合は

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda_j - x_j} &= \text{一定} \quad \text{for all } j \\ \sum_{i=1}^m r_i &= R; \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j = M \end{aligned}$$

より

$$x_j^* = \lambda_j - \frac{M - R}{n}, \quad j = 1, \dots, n$$

を得る。この  $x_j^*$  をもとに

$$\begin{aligned} x_{i1} + \dots + x_{in} &= r_i, \\ x_{1j} + \dots + x_{mj} &= x_j^*, \\ x_{ij} &\geq 0, \\ i &= 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

を北西隅法によって解けばそれが最適解となる。

次に移動時間が需要点  $i$  と施設  $j$  との位置関係によって異なる数値例を与える（窓口は 1 つ）。需要点は 3 点 ( $m = 3$ )、施設は 5 施設 ( $n = 5$ ) である。

$$\begin{aligned} r_1 &= 3, r_2 = 4, r_3 = 5, \\ \lambda_1 &= 4, \lambda_2 = 4, \lambda_3 = 3, \lambda_4 = 2, \lambda_5 = 3 \end{aligned}$$

そして移動時間は

| $i \backslash j$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | $r_i$ |
|------------------|---|---|---|---|---|-------|
| 1                | 3 | 6 | 7 | 5 | 2 | 3     |
| 2                | 2 | 8 | 6 | 4 | 6 | 4     |
| 3                | 8 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5     |
| $\lambda_j$      | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 |       |

ここに、

$$R = \sum r_i = 12; \quad M = \sum \lambda_j = 16$$

で与えられている場合を扱う。

初期設定として、 $d_{ij}$ を無視して

$$\frac{1}{\lambda_j - x_j} = \text{一定} \quad \text{for all } j$$

ただし  $\sum_{j=1}^5 x_j = R = 12$

より  $x_j^0$  を決定する。そうすると

$$x_1^0 = 3.2, \quad x_2^0 = 3.2, \quad x_3^0 = 2.2, \quad x_4^0 = 1.2, \quad x_5^0 = 2.2$$

となるから、 $d_{ij}$ を輸送費用とみなした輸送問題(S)を解くことにより、

$$\begin{aligned} x_{11}^0 &= 0.8, & x_{12}^0 &= 0, & x_{13}^0 &= 0, & x_{14}^0 &= 0, & x_{15}^0 &= 2.2, \\ x_{21}^0 &= 2.4, & x_{22}^0 &= 0, & x_{23}^0 &= 0.4, & x_{24}^0 &= 1.2, & x_{25}^0 &= 0, \\ x_{31}^0 &= 0, & x_{32}^0 &= 3.2, & x_{33}^0 &= 1.8, & x_{34}^0 &= 0, & x_{35}^0 &= 0 \end{aligned}$$

そして

$$\begin{aligned} D_1^0 &= \{1, 2\}, \quad D_2^0 = \{3\}, \quad D_3^0 = \{2, 3\}, \quad D_4^0 = \{2\}, \quad D_5^0 = \{1\} \\ d_1^0 &= 3, \quad d_2^0 = 3, \quad d_3^0 = 6, \quad d_4^0 = 4, \quad d_5^0 = 2 \end{aligned}$$

を得る。このとき

$$w^0 = \max_j \left( \frac{1}{\lambda_j - x_j^0} + d_j^0 \right) = 7.35$$

となる。

次に、今求めた  $d_j^0$  をもとにして

$$\frac{1}{\lambda_j - x_j} + d_j^0 = \text{一定} \quad \text{for all } j,$$

$$\sum_{j=1}^5 x_j = 12$$

より  $x_j^1$  を決定する。そうすると

$$x_1^1 \approx 3.71, \quad x_2^1 \approx 3.71, \quad x_3^1 \approx 0.23, \quad x_4^1 \approx 1.56, \quad x_5^1 \approx 2.77$$

前段と同様にして、輸送問題(S)を解いて

$$\begin{aligned} x_{11}^1 &= 0.23, & x_{12}^1 &= 0, & x_{13}^1 &= 0, & x_{14}^1 &= 0, & x_{15}^1 &= 2.77, \\ x_{21}^1 &= 3.48, & x_{22}^1 &= 0, & x_{23}^1 &= 0, & x_{24}^1 &= 0.52, & x_{25}^1 &= 0, \\ x_{31}^1 &= 0, & x_{32}^1 &= 3.71, & x_{33}^1 &= 0.23, & x_{34}^1 &= 1.06, & x_{35}^1 &= 0 \end{aligned}$$

および

$$D_1^1 = \{1, 2\}, D_2^1 = \{3\}, D_3^1 = \{3\}, D_4^1 = \{2, 3\}, D_5^1 = \{1\}$$

したがって

$$d_1^1 = 3, d_2^1 = 3, d_3^1 = 4, d_4^1 = 3, d_5^1 = 2$$

を得る。

前段と同様に、上記で求めた  $d_j^1$  をもとにして

$$\frac{1}{\lambda_j - x_j} + d_j^1 = \text{一定} \quad \text{for all } j,$$

$$\sum x_j = 12$$

により  $x_j^2$  を決定する。そうすると

$$x_1^2 \approx 3.37, x_2^2 \approx 3.37, x_3^2 \approx 1.26, x_4^2 \approx 1.37, x_5^2 \approx 2.63$$

再び輸送問題 (S) を解いて

$$\begin{aligned} x_{11}^2 &= 0.37, & x_{12}^2 &= 0, & x_{13}^2 &= 0, & x_{14}^2 &= 0, & x_{15}^2 &= 0, \\ x_{21}^2 &= 3.00, & x_{22}^2 &= 0, & x_{23}^2 &= 0, & x_{24}^2 &= 1.00, & x_{25}^2 &= 0, \\ x_{31}^2 &= 0, & x_{32}^2 &= 3.37, & x_{33}^2 &= 1.26, & x_{34}^2 &= 0.37, & x_{35}^2 &= 2.63 \end{aligned}$$

したがって

$$D_1^2 = \{1, 2\}, D_2^2 = \{3\}, D_3^2 = \{3\}, D_4^2 = \{2, 3\}, D_5^2 = \{1\}$$

および

$$d_1^2 = 3, d_2^2 = 3, d_3^2 = 4, d_4^2 = 3, d_5^2 = 2$$

を得る。この結果を観察すると

$$d_j^1 = d_j^2 \quad \text{for all } j$$

となっている。この結果、今上で求めた  $x_{ij}^2$  がこの例の最適割り当てとなっていることがわかる。このとき

$$v^* = \frac{1}{\lambda_j - x_j^2} + d_j^2 \approx 4.57$$

が最適期待時間となる。

次に施設  $j$  での窓口の数が 2 の場合を考えると

$$h_j(x_j) = \frac{1}{2\lambda_j + x_j} + \frac{1}{2\lambda_j - x_j}$$

であるから

$$h_j(x_j) = t$$

より

$$x_j = \sqrt{4\lambda_j^2 - \frac{1}{t}}$$

を得る。従って

$$\sum_{j=1}^n \sqrt{4\lambda_j^2 - \frac{1}{t}} = R$$

の解を  $t^*$  とすると  $x_j^*$  が計算できる。この例からもわかるように移動時間が一定の場合も数値的方法に頼らなければならない。

## 参考文献

- [1] Berman, O. and Larson, R. (1985) Optimal 2-Facility Network Districting in the Presence of Queuing, Transpotation Science, Vol.19, pp.261-277.
- [2] Cooper, R.B. (1990) Queuing Theory. In Handbooks in Operations Research and Management Science, Vol.2, D.P. Heyman and M.J. Sobel (eds). North-Holland, New York.
- [3] Drezner (Editor). (1997) Facility Location: A Survey of Applications and Methods. Springer; New York.
- [4] Hotelling, H. (1929) Stability in Competition, The Economic Journal, Vol.30, pp.41-57.