公益社団法人日本都市計画学会 都市計画報告集 No.11, 2012 年 5 月
Reports of the City Planning Institute of Japan, No.11, May, 2012

コンパクトシティ・システムを内包する立体都市モデルにおける総移動コストの定式化
―階層的な拠点と交通手段の導入を仮定して―

Formulation of total travel cost in a three-dimensional urban model containing compact city system
-Assuming introduction of hierarchical districts and transportation-

近藤　赳弘 [*]・吉川　徹 [**]
Kondo Takehiro[*]・Yoshikawa Tohru[**]

The purpose of the present study is to formulate the total travel cost in a city with compact city system where the hierarchical district centers and transportation system are formed according to the stages of life needs. To this end, a three-dimensional urban model is formulated to deal with population density explicitly, which consists of two stages of districts centers. By adopting three-dimensional rectilinear distance metric, the total travel cost from each houses to the second stage district center, which is located at the middle of the city, is obtained in the form of the integral.

Keywords : Compact City System , Life Needs , District Centers , Travel Cost
コンパクトシティ・システム、生活需要、地域拠点、移動コスト

１．背景・目的

本論文は、コンパクトシティ・システムが成立する都市について、総移動コストを最小化する立体都市形態を示すことを目的とする。

あらゆる生活需要を満たすコンパクトシティを実現する都市形態の一つとして、コンパクトシティ・システム [1)2)] がある。生活域と公共交通機関の段階性を前提として、複数の小さなコンパクトシティが連携したコンパクトシティ・システムは、コンパクトシティの欠点として時に指摘される多彩なサービスなど都市性の欠如を解決できるため、適用性が高いと期待できる。また、公共交通機関それぞれの輸送特性に沿った段階的な公共交通機関を導入することで、より効率的な移動が可能となると考えられる。

コンパクトシティ・システムについては、例えば近藤ら [3)] の研究がある。近藤らは、移動時間の最適化という観点から、単純な都市モデルを設定し分析している。その結果、生活需要の段階に応じた多段階の生活拠点と交通機関を導入することで、平均移動時間が１割以上短縮できることが示されている。しかし、人口密度分布すなわち立体都市形態を加味していないなど、現実の都市にそぐわない部分もある。

一つの都市について最適な立体的都市形態を示した研究として、腰塚 [4)] や、栗田ら [5)] によるものがある。これらの論文では直方体の都市モデルを想定しているのに対し、本研究ではあらかじめ都市形態を与えず、地点によって都市の建物の高さが変化するモデルについて考察している点に違いがある。また、腰塚とは異なり、都市域の任意の地点に都市域の外からの交通の入り口があることは想定せず、都市域の外との接点は拠点１カ所にのみあるものとする。これは、公共交通機関を中心としたコンパクトシティ・システムが成立する都市を前提としているためである。鈴木 [6)] や、青木 [7)] によるものは、拠点の存在を仮定していないことや、生活域の段階性について考慮されていないため、本研究とは目的が異なる。また、羽賀ら [8)] は、隣棟間隔を考慮して非連続な空間における都市モデルを想定し移動負荷を求めているが、本研究では連続な空間を想定することとする。

以上より、本研究では、コンパクトシティ・システムを形成するように外生的に段階的な地域拠点を設定し、拠点間を公共交通機関でつないだ都市を想定する。この時、住民は多層住宅に住んでおり、最寄りの地域拠点を利用すると仮定する。その上で、住戸から各段階の拠点までの移動コストを集計し、人口密度分布と対応する水平・垂直方向都市形態に対応する総移動コストを定式化することとする。

なお、本研究を行うにあたって、先に線状都市について最適な都市形態と拠点位置を求め [9)]、これを参考にしながら三次元立体都市形態について総移動コストを定式化した。

２．本研究のモデル

本論文では、コンパクトシティ・システムを形成するように、生活需要の段階に応じた階層的な生活拠点と生活域を想定する。生活域を生活需要に沿った活動パターンが完結する最少範囲と考え、図１のように３段階の生活域を想定する。この時、それぞれの生活域には生活需要を満たす地域拠点が存在するものと仮定し、地域拠点は交通拠点を併設しているものと仮定する。具体的には、最も高頻度な生活需要に対応する１次拠点と、中頻度な生活需要に対応する２次拠点、低頻度な生活需要に対応する３次拠点の３種類の地域拠点が存在することを仮定する。このうち、１次拠点へ移動する場合と、２次拠点へ移動する場合について、総移動コストを求めることとする。３次拠点への移動については、あらゆる３次拠点への移動を考慮すると、２次拠点以降の移動負荷を平均すると一定であると仮定できるた

＊　三菱電機インフォメーションシステムズ株式会社　修士（工学）　Mitsubishi Electric Information Systems Corporation, M.Eng.
＊＊　首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域　教授・博士（工学）　Prof., Department of Architecture and Building Engineering, Tokyo Metropolitan University, Dr.Eng.

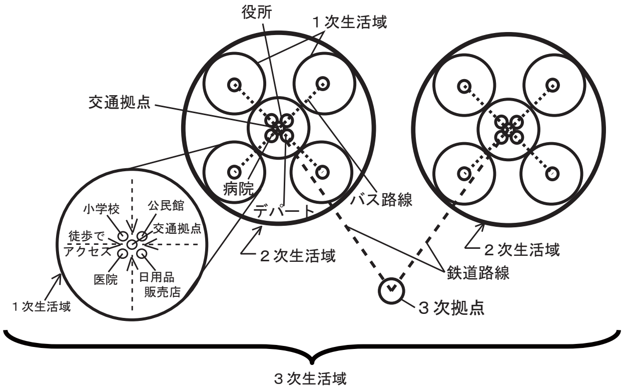

図 1. 都市モデルの概要

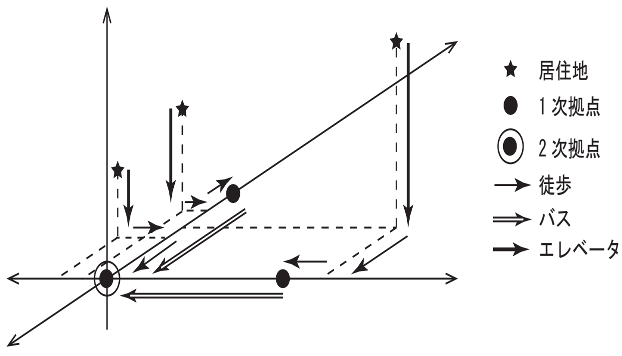

図 2. 移動方法

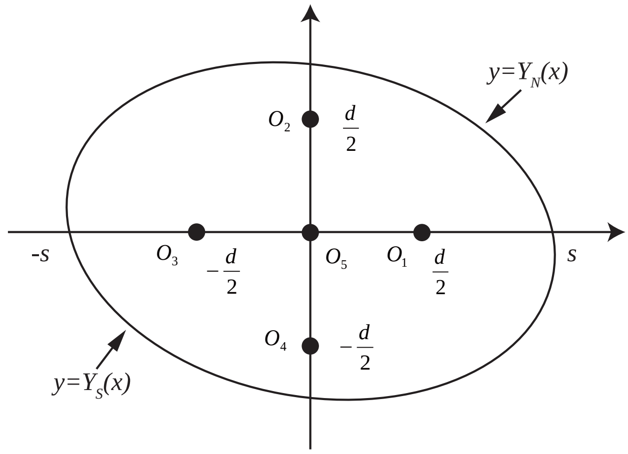

図 3. 拠点位置と都市域の設定

め、総移動コストは２次拠点への移動までを考えた場合と同じであるとする。また、本研究では、単位距離当たりの移動コストを各移動手段の平均移動時間の逆数と考え、公共交通機関や拠点の整備・運営にかかるコスト等については考慮しないこととした。移動手段としては、水平方向は徒歩を想定し、拠点間についてのみ、バスまたは鉄道での移動を想定する。また、垂直方向は、エレベータでの移動を想定する。

３. 立体都市における総移動コスト

３－1. 都市形態の決定

前述のような想定のもと、住民は水平方向の移動として徒歩とバス、垂直方向の移動としてエレベータを利用して２次拠点まで移動することを考える（図 2)。この時、2 次生活域は 1 つの鉄道駅を中心に形成されていることや、拠点は対称的に配置した方がより効率的であると考えられることから、図 3 のように、1 次拠点としてバス拠点が 4 つと、1 次拠点を併設した 2 次拠点が 1 つ存在するモデルを想定する。このモデルにおいて、前述の青木[7] を参考に総移動コストを定式化する。ただし、青木は、都市内の任意の点から任意の点までの移動を考慮して最適な都市形態を求めているが、本研究では都市内の任意の点から拠点までの移動を考慮する点に、違いがあることに留意されたい。

都市内の位置を座標 x で表し、都市域を

$$-s \le x \le s \tag{1}$$

$$Y_S(x) \le y \le Y_N(x) \tag{2}$$

と仮定する。ただし s は無限大を含む任意の実数とする。次に、地点 (x, y) における建物の階数を $h(x, y)$ で表し、計算の簡便さのために、この値は自然数ではなく非負の実数とする。また、都市形態は任意の地点において連続であるとする。この時、個人の位置は地点 x、y と居住階数 z で記述され、z は、

$$0 \le z \le h(x, y) \tag{3}$$

を満たす。ここで都市域の外側では人口は 0 であると考えると、

$$h(x, y) = 0$$
$$\text{for} \quad x \le -s, s \le x \quad 、 \tag{4}$$
$$y \le Y_S(x), Y_N(x) \le y$$

となる。また、都市居住者の単位必要面積は均一であると仮定と、人口密度と建物の高さは同一視でき、さらに総人口ないしは総延床面積で単位を基準化しておけば、次のようになる。

$$\int_{-s}^{s}\int_{Y_S(x)}^{Y_N(x)} h(x, y)\,dydx = 1 \tag{5}$$

本研究では、上下左右対称であることから、第一象限のみを考えることとする。住民は、最も小さいコストで 2 次拠点へ移動するとすれば、

$$c_{h1}\cdot(x+y) \ge c_{h1}\cdot\left|x-\frac{d}{2}\right| + c_{h1}\cdot y + c_{h2}\cdot\frac{d}{2}$$

または　(6)

$$c_{h1}\cdot(x+y) \ge c_{h1}\cdot x + c_{h1}\cdot\left|y-\frac{d}{2}\right| + c_{h2}\cdot\frac{d}{2}$$

つまり、

$$\frac{d}{4}\cdot\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le x \quad \text{または} \quad \frac{d}{4}\cdot\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le y \tag{7}$$

のとき、住民は 1 次拠点 0_1、あるいは、1 次拠点 0_2 を経由して 2 次拠点へ移動する。また、

$\frac{d}{4}\cdot\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le x < \frac{d}{2}$ かつ $\frac{d}{4}\cdot\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le y < \frac{d}{2}$ のときで、

$$c_{h1}\cdot\left|x-\frac{d}{2}\right| + c_{h1}\cdot y + c_{h2}\cdot\frac{d}{2} \le c_{h1}\cdot x + c_{h1}\cdot\left|y-\frac{d}{2}\right| + c_{h2}\cdot\frac{d}{2} \tag{8}$$

つまり、$x \ge y$ のとき、住民は 1 次拠点 0_1 を経由して 2 次拠点へ移動し、

$$c_{h1}\cdot\left|x-\frac{d}{2}\right| + c_{h1}\cdot y + c_{h2}\cdot\frac{d}{2} \ge c_{h1}\cdot x + c_{h1}\cdot\left|y-\frac{d}{2}\right| + c_{h2}\cdot\frac{d}{2} \tag{9}$$

つまり、$x \le y$ のとき、住民は 1 次拠点 0_2 を経由して 2 次拠点へ移動する。ここで、$\frac{d}{2} \le x$ かつ $\frac{d}{2} \ge y$ のとき、住民は 1 次拠点 0_1 を経由して 2 次拠点へ移動し、$\frac{d}{2} \ge x$ かつ $\frac{d}{2} \le y$ のとき、住民は 1 次拠点 0_2 を経由して 2 次拠点へ移動することは明ら

かである。さらに、マンハッタン距離を考えているため、$\frac{d}{2} \le x$ かつ $\frac{d}{2} \le y$ のとき、住民は 0_1、 0_2 どちらの 1 次拠点を経由してもコストは同じとなる。本研究では、以降の計算の簡便のため、$\frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le x < \frac{d}{2}$ かつ $\frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le y < \frac{d}{2}$ の場合と同様に、$x \ge y$ のとき、住民は 1 次拠点 0_1 を経由して 2 次拠点へ移動し、$x \le y$ のとき、住民は 1 次拠点 0_2 を経由して 2 次拠点へ移動すると仮定する。したがって、任意の点 P から 2 次拠点 0_5 までの移動コストは、

$$
\begin{aligned}
&C(x,y,z) = c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot y + c_d \cdot z \\
&\qquad \text{for} \quad 0 \le x < \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \text{、} \ 0 \le y < \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \\
&C(x,y,z) = c_{h1} \cdot \left| x - \frac{d}{2} \right| + c_{h1} \cdot y + c_d \cdot z + c_{h2} \cdot \frac{d}{2} \\
&\qquad \text{for} \quad \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le x \text{、} \ x \ge y \\
&C(x,y,z) = c_{h1} \cdot x + c_{h1} \cdot \left| y - \frac{d}{2} \right| + c_d \cdot z + c_{h2} \cdot \frac{d}{2} \\
&\qquad \text{for} \quad \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le y \text{、} \ x \le y
\end{aligned}
\tag{10}
$$

となる。その他の条件は、1 次拠点が 1 つの場合と同様であり、同様に計算を行うと、

$$
\begin{aligned}
&H_1(x,y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_1 \\
&\qquad \text{for} \quad 0 \le x < \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \text{、} \ 0 \le y < \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \\
&H_2(x,y) = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_2 \\
&\qquad \text{for} \quad \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le x < \frac{d}{2} \text{、} \ x \ge y \\
&H_3(x,y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_3 \\
&\qquad \text{for} \quad \frac{d}{2} \le x \text{、} x \ge y \\
&H_4(x,y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x + \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_4 \\
&\qquad \text{for} \quad \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le y < \frac{d}{2} \text{、} \ x \le y \\
&H_5(x,y) = -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot x - \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot y + C_5 \\
&\qquad \text{for} \quad \frac{d}{2} \le y \text{、} x \le y
\end{aligned}
\tag{11}
$$

となる。境界条件が、

$$
\begin{aligned}
&H_3(s,0) = 0 \text{、} \ H_1(x, Y_N(x)) = 0 \text{、} \ H_2(x, Y_N(x)) = 0 \\
&H_3(x, Y_N(x)) = 0 \text{、} H_4(x, Y_N(x)) = 0 \text{、} \ H_5(x, Y_N(x)) = 0 \\
&H_1\left(\frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right) = H_2\left(\frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right), y\right) \text{、} \\
&H_1\left(x, \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) = H_4\left(x, \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right) \text{、} \\
&H_2\left(\frac{d}{2}, y\right) = H_3\left(\frac{d}{2}, y\right) \text{、} \ H_4\left(x, \frac{d}{2}\right) = H_5\left(x, \frac{d}{2}\right) \\
&H_2(x,x) = H_4(x,x) \text{、} H_3(x,x) = H_5(x,x)
\end{aligned}
\tag{12}
$$

であることを考慮すると、

$$
\begin{aligned}
&C_1 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left\{ s - \frac{d}{2} \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\} \text{、} \\
&C_2 = C_4 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (s - d) \text{、} \ C_3 = C_5 = \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot s \\
&Y_N(x) = -x + s - \frac{d}{2} \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \\
&\qquad \text{for} \quad 0 \le x < \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \text{、} \ 0 \le y < \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \\
&Y_N(x) = x + s - d \quad \text{for} \quad \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le x < \frac{d}{2} \text{、} \ x \ge y \\
&Y_N(x) = -x + s \quad \text{for} \quad \frac{d}{2} \le x \text{、} x \ge y \\
&Y_N(x) = x - s + d \quad \text{for} \quad \frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le y < \frac{d}{2} \text{、} \ x \le y \\
&Y_N(x) = -x + s \quad \text{for} \quad \frac{d}{2} \le y \text{、} x \le y
\end{aligned}
\tag{13}
$$

となる。

３－２．総移動コストの算出

人口条件より式 (5) が成立しなければならない。この時、d と s の大小関係より、$Y_N(x)$ は、$\frac{d}{2} \le \frac{s}{2}$ つまり、$d \le s$のとき図 4、$s - \frac{d}{2} \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \ge \frac{d}{2}$ つまり、$d > s \ge \frac{d}{2} \cdot \left(2 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ のとき図 5、$s - \frac{d}{2} \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) < \frac{d}{2}$ かつ $s - \frac{d}{2} \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \ge -s + d$ つまり、$\frac{d}{4} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \le s < \frac{d}{2} \cdot \left(2 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ のとき図 6、$s - \frac{d}{2} \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) < -s + d$ つまり、$s < \frac{d}{4} \cdot \left(3 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)$ のとき図 7 のようになる。ここで、$d \le s$ について、y=x において対称な図形となることも考慮すると、人口条件より、

$$
\begin{aligned}
&\int_0^s \int_0^{Y_N(x)} H(x,y) dydx \\
&= \int_0^{\frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} \int_0^x -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \left[x + y - \left\{ s - \frac{d}{2} \cdot \left(1 - \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right) \right\} \right] dydx \\
&\quad + \int_{\frac{d}{4} \cdot \left(1 + \frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^{\frac{d}{2}} \int_0^x \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot \{ x - y + (s - d) \} dydx \\
&\quad + \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{s}{2}} \int_0^x -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (x + y - s) dydx \\
&\quad + \int_{\frac{s}{2}}^{s} \int_0^{-x+s} -\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (x + y - s) dydx \\
&= \frac{16 \cdot {c_{h1}}^3 \cdot s^3 + \left({c_{h2}}^3 + 3 \cdot c_{h1} \cdot {c_{h2}}^2 + 3 \cdot {c_{h1}}^2 \cdot c_{h2} - 7 \cdot {c_{h1}}^3\right) \cdot d^3}{192 \cdot {c_{h1}}^2 \cdot c_d} \\
&= \frac{1}{8}
\end{aligned}
\tag{14}
$$

となるので、

$$
s = \sqrt[3]{\frac{24 \cdot {c_{h1}}^2 \cdot c_d - \left({c_{h2}}^3 + 3 \cdot c_{h1} \cdot {c_{h2}}^2 + 3 \cdot {c_{h1}}^2 \cdot c_{h2} - 7 \cdot {c_{h1}}^3\right) \cdot d^3}{16 \cdot {c_{h1}}^3}} \tag{15}
$$

となる。この時、x 軸上の断面図、y=x 上の断面図を描くと、図 8、図 9 のようになる。この時、xy 平面に平行な面積は、

$0 \le z < \frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (s - d)$ のとき、

$$
\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{c_d}{c_{h1}} \cdot z + s\right)^2 \tag{16}
$$

$\frac{c_{h1}}{c_d} \cdot (s - d) \le z < -\frac{3 \cdot d}{4} \cdot \frac{c_{h1}}{c_d} + \frac{d}{4} \cdot \frac{c_{h2}}{c_d} + s \cdot \frac{c_{h1}}{c_d}$ のとき、

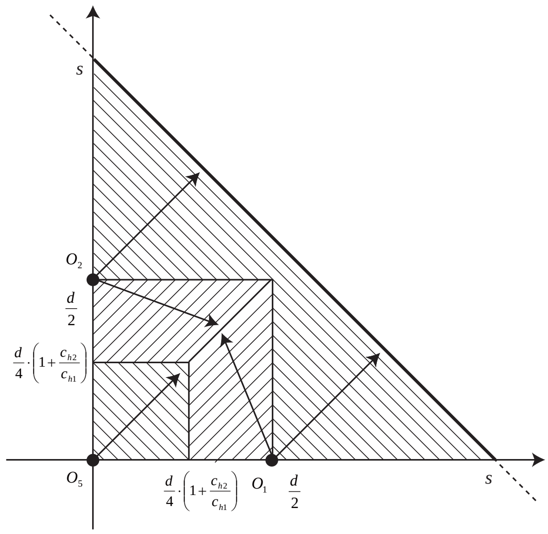

図 4. 都市の概形図その１

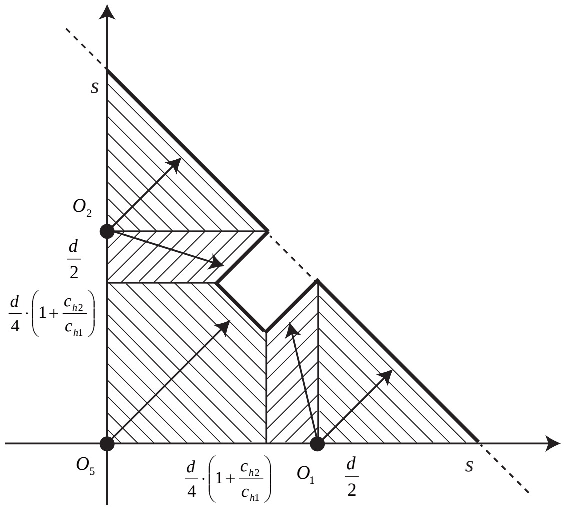

図 5. 都市の概形図その２

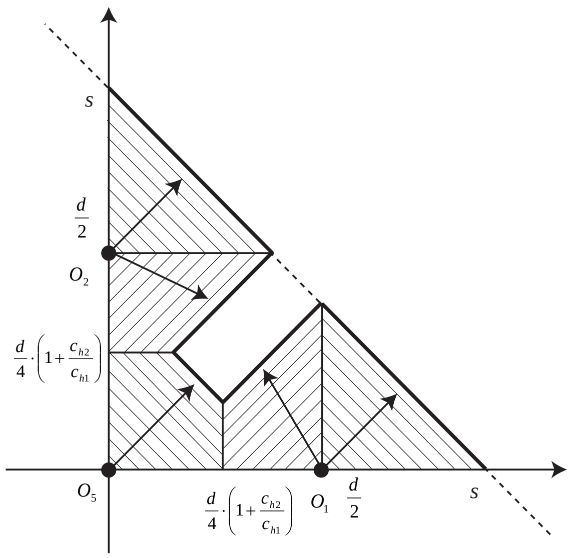

図 6. 都市の概形図その３

$$\frac{1}{2}\cdot\left\{\frac{1}{2}\cdot\left(-\frac{c_d}{c_{h1}}\cdot z+s-\frac{d}{2}\cdot\left(1-\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right)\right\}^2$$

$$+\frac{1}{2}\cdot\left[\left\{\left(-\frac{c_d}{c_{h1}}\cdot z+s-\frac{d}{4}\cdot\left(3-\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right)+\frac{1}{2}\cdot\left(-\frac{c_d}{c_{h1}}\cdot z+s-\frac{d}{2}\cdot\left(1-\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right)\right\}\right.$$

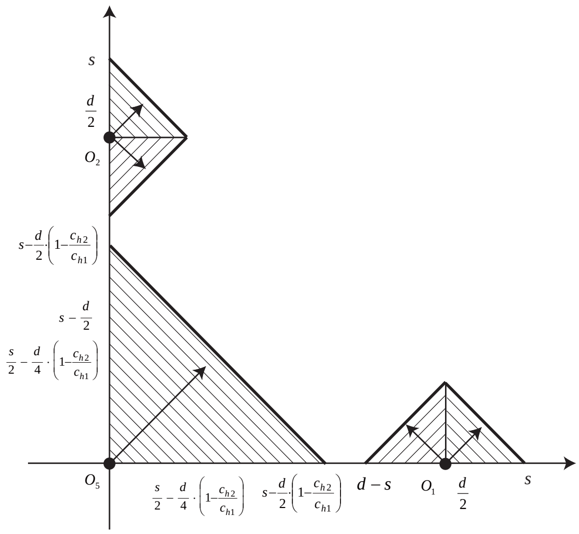

図 7. 都市の概形図その４

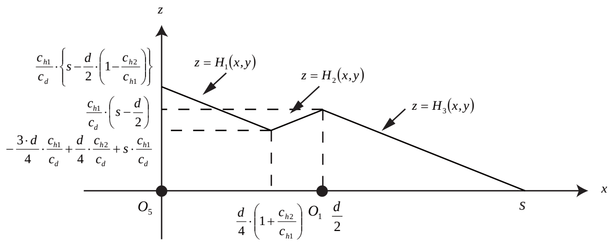

図 8. x 軸上の断面図

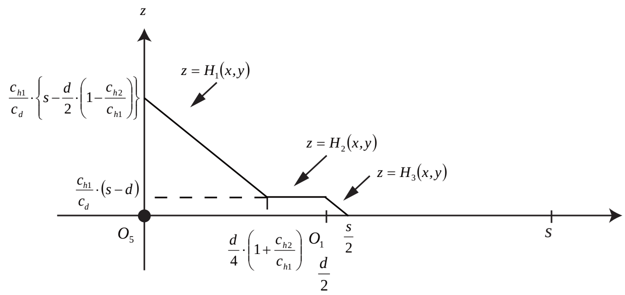

図 9. y=x 上の断面図

$$\left.\cdot\left\{\frac{d}{4}\cdot\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)-\frac{1}{2}\cdot\left(-\frac{c_d}{c_{h1}}\cdot z+s-\frac{d}{2}\cdot\left(1-\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right)\right\}\right] \tag{17}$$

$$+\frac{1}{2}\cdot\left[\left\{\left(-\frac{d}{2}-\frac{c_d}{c_{h1}}\cdot z+s\right)+\left(-\frac{c_d}{c_{h1}}\cdot z+s-\frac{d}{4}\cdot\left(3-\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right)\right\}\right.$$

$$\left.\cdot\left\{\frac{d}{2}-\frac{d}{4}\cdot\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right\}\right]+\frac{1}{2}\cdot\left(-\frac{c_d}{c_{h1}}\cdot z+s-\frac{d}{2}\right)^2$$

$-\frac{3\cdot d}{4}\cdot\frac{c_{h1}}{c_d}+\frac{d}{4}\cdot\frac{c_{h2}}{c_d}+s\cdot\frac{c_{h1}}{c_d}\leq z<\frac{c_{h1}}{c_d}\cdot\left(s-\frac{d}{2}\right)$ のとき、

$$\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{2}\cdot\left\{-\frac{c_d}{c_{h1}}\cdot z+s-\frac{d}{2}\cdot\left(1-\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right\}^2$$
$$+\frac{1}{2}\cdot\left\{\left(-\frac{c_d}{c_{h1}}\cdot z+s\right)-\left(\frac{c_d}{c_{h1}}\cdot z-s+d\right)\right\}\cdot\left(-\frac{d}{2}-\frac{c_d}{c_{h1}}\cdot z+s\right) \tag{18}$$

$\frac{c_{h1}}{c_d}\cdot\left(s-\frac{d}{2}\right)\leq z\leq\frac{c_{h1}}{c_d}\cdot\left\{s-\frac{d}{2}\cdot\left(1-\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right\}$ のとき、

$$\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{2}\cdot\left\{-\frac{c_d}{c_{h1}}\cdot z+s-\frac{d}{2}\cdot\left(1-\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right\}^2 \tag{19}$$

となり、これらを A, B, C, D とする。また、1 次拠点を経由して 2 次拠点へ移動する人々（体積）は、

$$
\begin{aligned}
&\int_{\frac{d}{4}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^{\frac{d}{2}}\int_0^x \frac{c_{h1}}{c_d}\cdot\{x-y+(s-d)\}dydx \\
&+\int_{\frac{d}{2}}^{\frac{s}{2}}\int_0^x -\frac{c_{h1}}{c_d}\cdot(x+y-s)dydx \\
&+\int_{\frac{s}{2}}^{s}\int_0^{-x+s} -\frac{c_{h1}}{c_d}\cdot(x+y-s)dydx
\end{aligned}
\tag{20}
$$

となり、これを E とする。以上より、総移動コストは、

$$
\begin{aligned}
\frac{1}{8}\cdot G = &\left\{\int_0^{\frac{d}{4}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}\int_0^x x\cdot H_1(x,y)dydx\right. \\
&+\int_{\frac{d}{4}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^{\frac{d}{2}}\int_0^x\left(\frac{d}{2}-x\right)\cdot H_2(x,y)dydx \\
&+\int_{\frac{d}{2}}^{\frac{s}{2}}\int_0^x\left(x-\frac{d}{2}\right)\cdot H_3(x,y)dydx \\
&+\int_{\frac{s}{2}}^{s}\int_0^{-x+s}\left(x-\frac{d}{2}\right)\cdot H_3(x,y)dydx \\
&+\int_0^{\frac{d}{4}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}\int_y^{\frac{d}{4}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)} y\cdot H_1(x,y)dxdy \\
&+\int_0^{\frac{d}{4}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}\int_{\frac{d}{4}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^{\frac{d}{2}} y\cdot H_2(x,y)dxdy \\
&+\int_{\frac{d}{4}\left(1+\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)}^{\frac{d}{2}}\int_y^{\frac{d}{2}} y\cdot H_2(x,y)dxdy \\
&+\int_0^{\frac{d}{2}}\int_{\frac{d}{2}}^{-y+s} y\cdot H_3(x,y)dxdy \\
&\left.+\int_{\frac{d}{2}}^{\frac{s}{2}}\int_y^{-y+s} y\cdot H_3(x,y)dxdy\right\}\cdot c_{h1} \\
&+\left\{\int_0^{\frac{c_{h1}}{c_d}\cdot(s-d)}(A\cdot z)dz\right. \\
&+\int_{\frac{c_{h1}}{c_d}\cdot(s-d)}^{-\frac{3\cdot d}{4}\cdot\frac{c_{h1}}{c_d}+\frac{d}{4}\cdot\frac{c_{h2}}{c_d}+s\cdot\frac{c_{h1}}{c_d}}(B\cdot z)dz \\
&+\int_{-\frac{3\cdot d}{4}\cdot\frac{c_{h1}}{c_d}+\frac{d}{4}\cdot\frac{c_{h2}}{c_d}+s\cdot\frac{c_{h1}}{c_d}}^{\frac{c_{h1}}{c_d}\cdot\left(s-\frac{d}{2}\right)}(C\cdot z)dz \\
&\left.+\int_{\frac{c_{h1}}{c_d}\cdot\left(s-\frac{d}{2}\right)}^{\frac{c_{h1}}{c_d}\cdot\left\{s-\frac{d}{2}\cdot\left(1-\frac{c_{h2}}{c_{h1}}\right)\right\}}(D\cdot z)dz\right\}\cdot c_d \\
&+E\cdot\frac{d}{2}\cdot c_{h2}
\end{aligned}
\tag{21}
$$

となる。なお、式 21 を展開すると式が複雑になりすぎるため、以降の計算式は掲載せず、式 21 を、総移動コストを求めるための式とする。

４．結論及び今後の課題

本研究では、立体都市において鉛直方向の人口分布を想定し、総移動コストを定式化した。式 21 のコストに具体的な値を代入し、総移動コスト G を最小化する x, y, z, s を求めると、最適な都市形態を示すことができると期待される。

さらなる課題としては、大きく二つ挙げられる。まず、移動コストの具体値の設定方法である。式 21 以降の計算では、想定するコストの値によって都市形態の挙動が変わってくる可能性もあるため、移動コストは慎重に設定する必要がある。次に、居住空間の想定を行うことである。本研究では、連続な空間を考慮し、単位当たりの空間に均等に人口が分布しているものと仮定しているが、隣棟間隔や階高についても考慮することで、より現実的な都市形態を求めることが可能となる。また、これらの値やコストの値を変えることで、最適な都市形態だけでなく、移動コストを最小化させる住宅形態等も考察することも可能となると期待される。

参考文献

1) 玉川英則編：『コンパクトシティ再考』、学芸出版社、2008
2) 杉浦芳夫：『立地と空間的行動』、古今書院、1989
3) 近藤赳弘、吉川徹：多段階の公共交通機関と地域拠点の導入による平均移動時間最小化モデル、日本都市計画学会都市計画論文集、45-3、pp. 139-144、2010
4) 腰塚武志：コンパクトな都市のプロポーション、日本都市計画学会都市計画論文集、30、pp. 499-504、1995. 11. 1
5) 栗田治、腰塚武志：省エネルギー直方体都市のプロポーション解析： 沙漠の摩天楼シバームの数理、日本建築学会計画系論文集、544、pp. 125-131、2001. 6
6) 鈴木勉：コンパクトな立体都市空間形態に関する考察、日本都市計画学会都市計画論文集、28、pp. 415-420、1993
7) 青木義次：よしつぐノート、２９総移動コストを最小化する都市形態、http://www.aokilab.arch.titech.ac.jp/lab/y_notes/notes/29_ynote.pdf、2010. 8 参照
8) 羽賀正和、吉川徹：空地及び高さの効用と移動負荷を考慮した高層・低層集合住宅群の比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、F-1、pp. 1483-1486、2010. 7
9) 近藤赳弘、吉川徹：移動コストを最小化する立体都市形態 階層的な生活息と交通手段の導入を仮定して、日本建築学会計画系論文集、675、pp. 1087-1093、2012. 5