

# 空の移動革命がもたらす都市構造の変化に 関する研究

-通勤道路面積の減少を考慮した都市規模ならびに移動距離の試算-

学生番号：2019160

氏名：佐々木里実

ゼミナール：大津ゼミ

指導教員：大津晶先生

提出年度：令和4年度提出

## 目次

### 第1章 研究の背景と目的

#### 1-1 研究の背景

#### 1-2 研究の目的

### 第2章 研究方法

#### 2-1 都市モデルの設定

#### 2-2 都市内の人の移動についての設定

### 第3章 通勤移動の三次元化による都市のコンパクト化

#### 3-1 不要になる道路面積

#### 3-2 都市のコンパクト化

#### 3-3 平均移動距離の変化

### 第4章 本研究のまとめと今後の展望

〈謝辞〉

〈参考資料〉

〈参考文献〉

## 第1章 研究の背景と目的

### 1-1 研究の背景

近年、新たなテクノロジーの進化に期待が寄せられている。エアモビリティの普及である。日本国内では2025年の大阪・関西万博での飛行を起点としたエアモビリティの実装が目指され、国内外の企業や団体が機体の製造、運行事業への参画を進めている。また国土交通省、経済産業省が『空の移動革命に向けた官民協議会』（注1）を設立し、技術開発や制度整備等について協議している。そのような中エアモビリティ普及後の都市構造の変化についてはあまり議論がなされていないが、一体どのような変化が起こりうるだろうか。

現在の都市の大多数は、都市の中心に企業のビルが立ち並ぶ就業地があり、その周りに住居や日常生活のための機能が揃う居住地がある仕組みになっている。このような都市構造は利便性、経済性が高い一方で、中央に近づくにつれ多くの道路面積が必要になる。例えば、東京都都市整備局『東京の土地利用 平成28年東京都区部』オープンデータ（注2）を用いて試算すると、現在の東京都の都心3区の道路率（総面積から水面を除く）は28%であり、地下鉄や電車が発達しているにもかかわらず約3割を道路に取られている。しかし、エアモビリティの普及により従来平面の道路を走行していた車が空を飛ぶようになれば、今ほど道路は不要になる。平面を道路と土地利用で取り合っている都市の姿の常識が覆る可能性があるのだ。また不要になる道路面積の分だけ都市全体の大きさをコンパクト化することもできる。

このようにエアモビリティの普及が人々の移動スタイルのみならず都市構造にも大きな変化を与えたとしたら、それについて研究する価値は大いにあると言える。

### 1-2 研究の目的

本研究の目的は、三次元交通の一般化によって実現可能になる都市構造がどのようなものであるか、またその都市構造が人々に与える影響がどのようなものであるかについて、従来の都市と比較しながら定量的に明らかにすることである。三次元交通が実現したのちの都市計画において有意義な研究となるこ

とを期待する。具体的には以下のことを明らかにしたい。

- ・三次元交通の一般化によってどれくらいの道路が不要になるか
- ・不要になる道路面積の分だけ都市をコンパクト化すると、都市の大きさがどれだけ小さくなるか
- ・従来都市の移動距離とコンパクト化した都市の三次元交通での移動距離はどれくらい異なるか

## 第2章 研究方法

### 2-1 都市モデルの設定(図1)

本研究の手法はモデル分析とする。また、本研究で対象となる都市モデルを以下のように定義する。

- 1.半径が  $R(m)$ である円形都市が二つのゾーン、半径が  $r(m)$ である円形の就業地とそれを取り巻くドーナツ方の居住地に分けられる。
- 2.就業地の半径  $r=3000m$ 、居住地の半径  $R=10000m$  とする。
- 3.道路網は無数の放射・環状ネットワークから構成されている。またエアモビリティによる三次元交通でも同様の交通整備がされることにする。

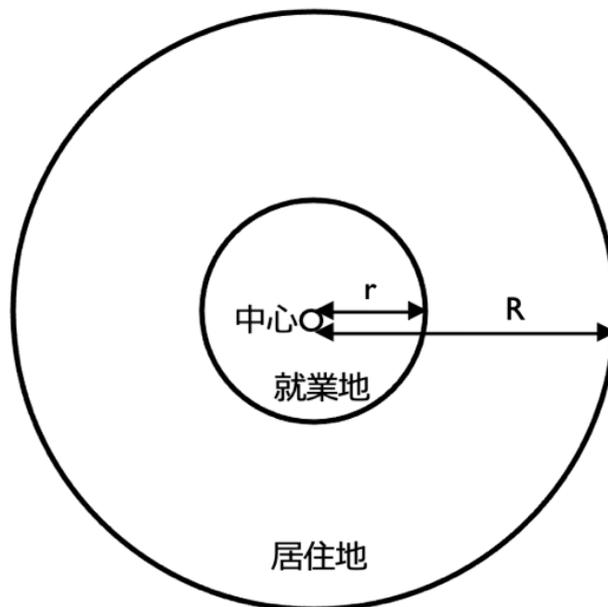


図1 同心円状の都市モデル

## 2-2 都市内の人の移動についての設定(図 2)

第 3 章では、先行研究である李[1]通勤交通のための円形都市での道路面積に沿い、通勤交通の三次元化により不要になる道路面積を計算していく。その際に必要となる、都市内の人の移動に関する条件を以下のように定義する。

4.人口 200 万人の都市で、就業地に通勤・通学する人口は全人口の半分の 100 万人とする。

5.就業者（本研究では、就業地に通勤・通学する者を総じて就業者と呼ぶことにする。）は円形就業地の中に密度  $\gamma$  で一様に分布する。

6.就業者は、都市内の放射・環状路に沿って最短距離で移動し、一人の通勤者が就業地と居住地内のどこか一点を行き来する確率は、居住地内の一様分布に従うものとする。最短距離での移動は二通りある。就業地内の任意の点 A と居住地内の任意の点 B を行き来するとき、放射路のみを利用し都市の中心 O を通る場合と、O' を通る環状路を利用する場合である。これらは角 A O B の角度の大きさによって決まる。図 2 を参考にしてもらいたい。

7.就業地に通勤・通学する際の移動手段は車（三次元交通ではエアモビリティ）のみとする。

8.通勤ラッシュは朝の 7 時台と 8 時台の 2 時間で幅員 3 m の 1 車線を 1800 台が通る。奥平[2]、李[1]の流動線面積の考え方で求められる車幅は  $\alpha = 1/600\text{m}$  である。

9.エアモビリティの想定飛行高度は 150m とし、また離着陸は離発着場からの垂直移動とする。

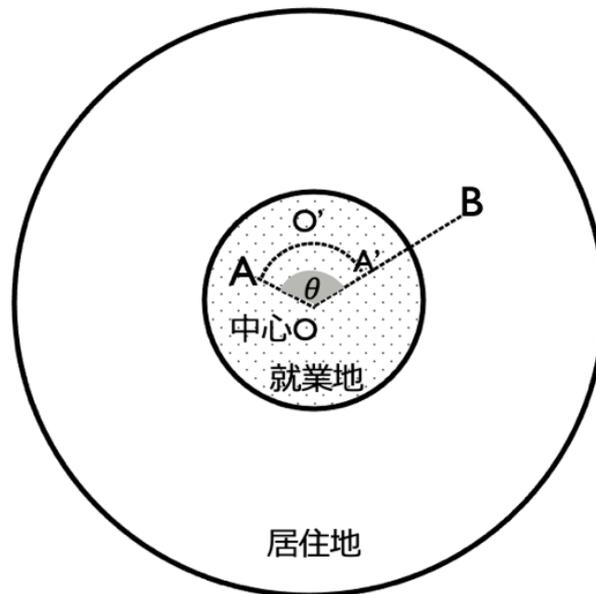


図2 同心円状都市内での通勤移動パターン

上の仮定で、1.3.5.6.8.は李[1]で用いられている概念である。東京を含む多くの大都市は、1.のような同心円状の都市構造となっており、また近似的ではあるが3.のような道路構造をもっている。3.の三次元交通に関しては直線距離での移動も可能ではあるのだが、エアモビリティが一般化される段階では無秩序な直線距離での移動ではなく、交通網に沿った移動がなされると考え定義した。また8.で言及した流動線面積の考え方を李[1]は次のように説明している。

「流動線面積というのは、文字どおりクルマが移動するときに必要な面積であり、図-2のように単位時間の間のどこかで始点Mから終点Nまで移動した1台の車に対して、その移動距離 $l$ と単位時間の間に車が通るために必要な幅 $\alpha$ の積として表される(伊藤、奥平、田口)。

例えば、ある都市ではラッシュが1時間にわたるとする。またこの都市のなかの道路では、幅員3mの1車線で900台の車が走れるとする。このとき、要求される時間内に単位幅あたり移動可能な車の量は300台/mであり、車1台あたりに必要な幅は $\alpha = \frac{1}{300}$  mとなる。そして、ある車がラッシュの間に都市内の道路を $l=3,000$ m 走ったとすると、その流動線面積は $S = \alpha \times l = 10 \text{ m}^2$ となる。このように流動線面積の概念から出発して、ある領域に必要な道路面積は、そのなかで移動した車の流動線面積の総和

として導出することができる。」 [1]p.1064

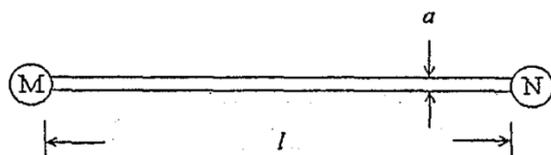


図-2 流動線面積

図3 李[1]引用資料

## 第3章 通勤移動の三次元化による都市のコンパクト化

### 3-1 不要になる道路面積

第2章で定義したモデルと条件を踏まえ、通勤移動が三次元化したときに不要になる道路面積を導く。本研究では、エアモビリティが一般化された場合の通勤交通は100%空の上で行われるという前提とする。よって二次元の通勤交通に要する道路面積は、全て不要になると解釈する。ここでは李[1]で求められた、流動線面積を用いた通勤交通のための円形都市での道路面積割合の式を用いる。細かい計算は先述の論文で解説されているため、以下に結果のみを記述する。

$$\text{円形就業地内での道路面積の割合} = \frac{2(5\pi-4)}{3\pi} a\gamma r$$

$$\text{環状住宅地内での道路面積の割合} = \frac{2}{3} a\gamma r^2 \left[ \frac{(2R+r)}{(R+r)^2} \right]$$

円形就業地・環状住宅地は、本研究での就業地・居住地と同義である。本研究の都市モデルを式に当てはめて計算すると、

就業地での道路面積の割合

$$\begin{aligned} & \frac{2(5\pi-4)}{3\pi} \times \frac{1}{600} \times \frac{4}{100} \times 3000 \\ & \cong 0.497(49.7\%) \end{aligned}$$

就業地での道路面積

$$28260000 \times 0.497 = 14045220(\text{m}^2)$$

居住地での道路面積の割合

$$\begin{aligned} & \frac{2}{3} \times \frac{1}{600} \times \frac{4}{100} \times 3000^2 \left[ \frac{(2 \times 10000 + 3000)}{(10000 + 3000)^2} \right] \\ & \cong 0.054(5.4\%) \end{aligned}$$

居住地での道路面積

$$285740000 \times 0.054 = 15429960(\text{m}^2)$$

である。また、都市全体での道路面積は 29,475,180 m<sup>2</sup>となるため、都市全体での道路面積割合は 9.4%である。居住地での道路面積の割合が小さくなっているが、その主な理由は、本研究の設定では居住地内の行き来のための移動を考慮していないことである。居住地内の行き来の例としては、居住地内にある学校や病院、公共施設、スーパーマーケットと自宅の行き来などが挙げられる。以上で導いた道路面積が、通勤移動が三次元化した時に不要になる道路面積である。

### 3-2 都市のコンパクト化

次に、本研究で最初に定義した半径 R=10000m の都市モデルから不要になる道路面積を減算し、残りの面積で新しい同心円状都市モデルを形成する。これにより三次元交通での通勤移動がもたらす都市のコンパクト化の上限値を知ることができる。ここからは最初に定義したモデルのことを従来モデル、三次元交通前提でコンパクト化された都市のことを三次元交通新モデルと呼ぶことにする。また三次元交通新モデルの就業地の半径を r'、都市全体の半径を R' と表すことにする。計算は以下の通りである。

[就業地]

道路面積分を減算した就業地の面積を導く。

$$28,260,000 - 14,045,220 = 14,214,780 \text{ m}^2$$

円周率 $\pi$ を 3.14 とすると、

$$r' = \sqrt{\frac{14214780}{3.14}}$$

$$r' \doteq 2,128 \text{ m}$$

[都市全体]

道路面積分を減算した都市全体の面積を導く。

$$314,000,000 - 29,475,180 = 284,524,820 \text{ m}^2$$

$$R' = \sqrt{\frac{284524820}{3.14}}$$

$$R' \doteq 9,519\text{m}$$

従来モデルと三次元交通新モデルを比較した図を以下に示す。就業地の大きさは大幅に変化したことが一目で分かるが、面積は49.7%、就業地の半径は29.1%削られている。一方、都市全体の大きさはあまり小さくなっていないように見える。面積は9.4%、都市全体の半径は4.8%しか削られていない。しかし、割合にすると小さな数字であるが実際には29,475,180 m<sup>2</sup>という札幌市厚別区(24 km<sup>2</sup>)より大きな面積が削られている。この結果が、三次元交通での通勤移動がもたらす都市のコンパクト化の上限値となる。

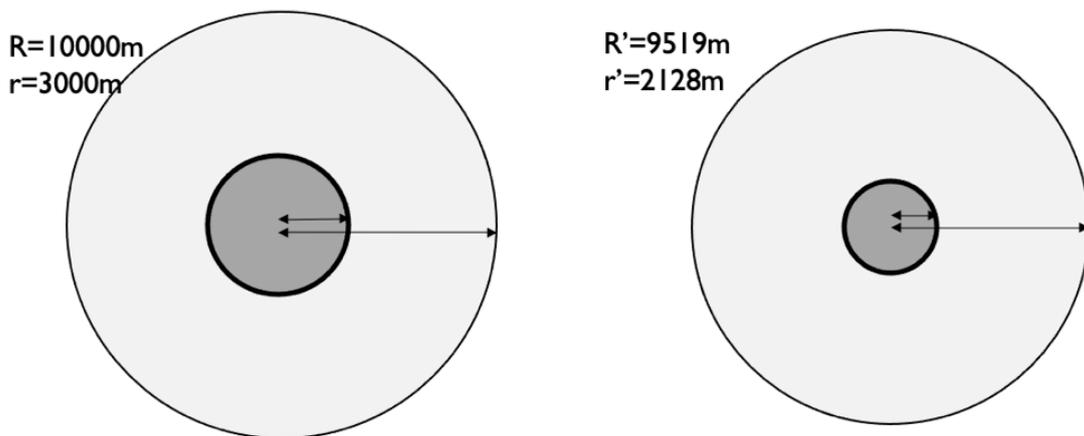


図4 都市の大きさの比較

### 3-3 平均移動距離の変化

都市のコンパクト化によって生じる影響として、移動距離の短縮が挙げられる。しかし定義9.の通り、三次元交通を行う都市モデルでの通勤では離着陸の垂直移動があるため、合計300m移動距離が伸びる。この定義を踏まえ三次元交通新モデルと従来モデルの通勤のための移動距離を比較したとき、都市のコンパクト化による距離の短縮が垂直移動の距離の分を補えるか、また何mの違

いがあるかを明らかにする。計算方法を以下に示す。

就業地の中の一点（中心 O から  $x$  離れている就業地内の A）と、居住地の中の一点（中心 O から  $\rho$  離れている居住地内の B）の間を放射・環状ネットワーク網に沿って移動する時の最短経路は

$$g(x, \rho, \theta) = \begin{cases} x + \rho (\theta \geq 2, A - O - A' - B) \\ (\theta - 1)x + \rho (\theta \leq 2, A - O' - A' - B) \end{cases}$$

ここで  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq \pi$ ) は放射線 OA と OB が成す角度である。図 2 を参考にしてみたい。

就業地のなかの一人の通勤者が居住地内の任意の一点に向かう確率は一様分布に従うため、その密度関数は

$$f(\rho, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{\pi(R^2 - r^2)} (r \leq \rho \leq R) \\ 0 (\text{その他}) \end{cases}$$

中心 O から  $x$  m だけ離れているところの就業者が移動する距離の平均値は

$$\begin{aligned} E[g(x, \rho, \theta)] &= \iint_D f(\rho, \theta) g(x, \rho, \theta) dD \\ &= 2 \int_0^\pi \int_r^R f(\rho, \theta) g(x, \rho, \theta) \rho d\rho d\theta \\ &= \frac{2}{\pi(R^2 - r^2)} \left\{ \int_2^\pi \int_r^R (x + \rho) \rho d\rho d\theta + \int_0^2 \int_r^R [(\theta - 1)x + \rho] \rho d\rho d\theta \right\} \\ &= \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) x + \frac{2(R^2 + r^2 + Rr)}{3(R + r)} \end{aligned}$$

以上の計算で就業地のどこかにいる就業者一人が移動する距離の平均値を導くことができる。ここまでは李[1]で用いられている計算方法である。さらに今回は都市全体としての通勤移動に要する距離の平均を導きたいため、加えて以下の計算をする。

$x$  に数字を代入し、就業地に一様に分布するすべての就業者が移動する距離の平均値を求める（通勤人口を  $N$  とする）

$$\frac{\int_0^r E(x) dx \times \frac{n}{r}}{n}$$

まずは従来モデルでの通勤に要する平均移動距離の計算を行う。

$$E[g(x, \rho, \theta)] = \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)x + \frac{2(10000^2 + 3000^2 + 10000 \times 3000)}{3(10000 + 3000)}$$

$$= \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)x + 7128$$

$$\frac{\int_0^{3000} \left\{ \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)x + 7128 \right\} dx \times \frac{1000000}{3000}}{1000000}$$

$$= 7660$$

従来モデルでの就業者全体の通勤に要する平均移動距離は 7760m となる。

次に三次元交通新モデルでの通勤に要する平均移動距離の計算を行う。

$$E[g(x, \rho, \theta)] = \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)x + \frac{2(9519^2 + 2128^2 + 9519 \times 2128)}{3(9519 + 2128)}$$

$$+ 300$$

$$= \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)x + 6905$$

$$\frac{\int_0^{2128} \left\{ \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)x + 6905 \right\} dx \times \frac{1000000}{2128}}{1000000}$$

$$= 7276$$

三次元交通新モデルでの就業者全体の通勤に要する平均移動距離は 7276m となる。

三次元交通新モデルでの通勤移動において、都市のコンパクト化による距離の短縮が垂直移動の距離の分を補えるか、という問いに対しては補えることがこの結果から明らかになった。そして就業者全体の平均として、従来モデルより 5%移動距離が短縮された。ただし、従来モデルより移動距離が短縮できたと言っても、都市のコンパクト化が通勤移動距離の短縮に大きな影響を及ぼすとは結論付けられない。移動距離が大幅に短縮しなかったことの主な理由とし

では、都市全体の半径が従来モデルから 4.8%しか短くなっていないことが挙げられる。

では移動距離の短縮による、移動所要時間や移動に要するエネルギー消費量への影響はどうだろうか。

移動距離の短縮が及ぼす移動所要時間への影響は、薄いと考えられる。なぜならエアモビリティの想定飛行速度は遅くても 100km/時(注 1)とされていることを踏まえると、距離の短縮の有無は関係なく、その移動の速さで十分二次元交通の移動所要時間を凌駕すると考えられるからである。

エネルギー消費量への影響に関しては研究の余地がある。エネルギー消費量は、移動距離はもちろん使用するモビリティのエネルギー消費効率や渋滞などの交通状況にも結果が左右される。例えば将来エアモビリティのバッテリーの効率が飛躍的に改善されれば移動距離の短縮はあまり意味のないものになる。ただし、100万人の通勤人口を持つ本モデルのような都市では就業者一人一人の移動距離短縮が都市全体のエネルギー消費量の削減に大きく貢献する可能性はある。

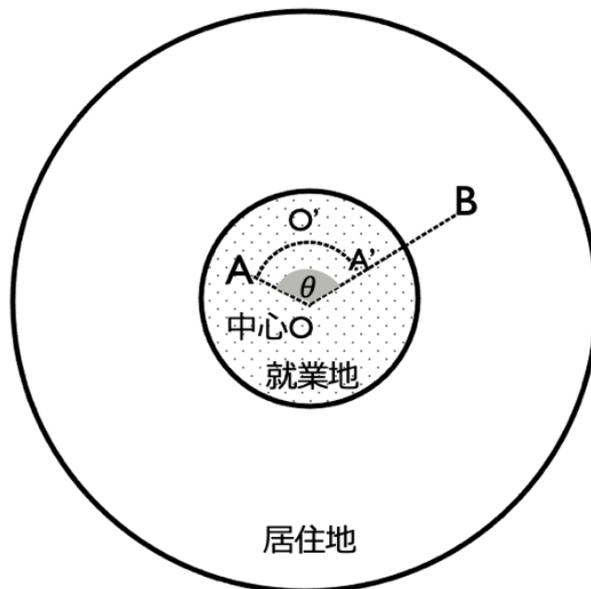


図2 同心円状都市内での通勤移動パターン (再掲)

## 第6章 本研究のまとめと今後の展望

本研究では単純化した都市モデルを用いて、三次元交通の一般化によって実現可能になる都市構造がどのようなものであるか、またその都市構造が人々に与える影響がどのようなものであるかを従来の都市と比較しながら定量的に分析した。

本モデルの結果としては、不要になる道路をなくして都市をコンパクト化した場合、従来の都市より9.4%面積が小さくなり、特に就業地面積は49.7%も小さくなることが分かった。しかし都市のコンパクト化による通勤移動距離の短縮は5%と大幅短縮とは見られず、エアモビリティ離発着のための垂直移動分+400m弱を補える程度の結果となった。

先行研究に沿い、通勤交通に限定した道路面積の計算を行ってきたが、モデルや前提条件を改良し通勤以外の移動に使われる道路面積も計算できれば、より正確に不要になる道路面積を求めることができるだろう。また三次元交通の移動所要時間やエネルギー消費量についての計算は今後の課題とする。そして、三次元交通の実現による土地利用の変化についても今後の課題とする。

## 〈謝辞〉

本研究の遂行にあたり、終始温かくそして多大なご指導を賜った大津晶教授に深く感謝申し上げます。また、三次元交通チームとして共に研究を進めてきた荒川萌和さん、佐藤香菜さん、若林一真さんにも大変お世話になりました。大津晶教授とチームの皆様のご助言無しには研究内容を充実させられなかったと存じます。最後に、2年間共にゼミナール活動を行ってきた大津ゼミナール生各位に深く感謝申し上げます。

## 〈参考資料〉

(注1)国土交通省『空の移動革命に向けた官民協議会』  
[https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk2\\_000007.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk2_000007.html)、参照日 2022 年 11 月 1 日

(注2)東京都都市整備局『東京の土地利用 平成 28 年東京都区部』オープンデータ一覧  
[https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/seisaku/tochi\\_c/tochi\\_5list.html](https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/seisaku/tochi_c/tochi_5list.html)、参照日 2022 年 11 月 1 日

## 〈参考文献〉

[1]李明哲「通勤交通に要する円形都市の道路面積」、『2000 年度第 35 回日本都市計画学会学術研究論文集』、2000 年、 p.1063- 1068

[2]奥平耕造『都市工学読本』、彰国社、1976 年、p.29-41