

No.12	提 案 名： ネットワーク型コンパクトシティに向けた宇都宮市の交通ネットワーク設計	
	提案団体名：宇都宮大学 藤井研究室	
	所 属：宇都宮大学大学院 地域創生科学研究科 工農総合科学専攻	
	代 表 者：渋谷龍気	指導教員：藤井雅弘
メンバー	渋谷龍気	

## ○ 提案の要旨

宇都宮市は少子高齢化や交通渋滞、公共交通機関の利用者減少などの課題を抱えている。本研究では、これらの課題を解決するため、MaaS (Mobility as a Service) の概念に基づき、OD (Origin Destination) フローに基づいた交通ネットワークの設計を行う。まず、施設配置問題を解き、現実の交通施設を考慮しつつ交通の乗り換え地点となるハブ配置を行う。その後、夜間人口と昼間人口のデータから OD フローを推定し、各ハブを結ぶバス路線を設計する。また、路線設計においては、既存の鉄道ネットワークを活用し、現実的な道路ネットワークを考慮する。最終的に、OD フローと路線ポイントを基に、未来の宇都宮市にとって最適な交通ネットワークを設計する。

### 1. 提案の背景・目的

栃木県宇都宮市は、栃木県の県庁所在地であり、人口約 51 万人を有する都市である。宇都宮市では、2023 年 8 月に次世代型の路面電車である LRT (Light Rail Transit) が新規開業し、全国から注目を集めている。しかし、宇都宮市では少子高齢化や人口減少、自動車保有台数の高さによる交通渋滞の常態化、公共交通機関の利用者減少など様々な課題がある。これらの課題を解決し、街の未来を考えていくにあたって、自動車に頼らない生活の実現が急務となっている。そこで近年注目されているのが、MaaS (Mobility as a Service) である。MaaS とは、公共交通を含めた自家用車以外の様々な交通手段による移動を一つのサービスとして捉えシームレスにつなぐ移動の概念のことである。MaaS では、交通弱者への支援、交通の混雑緩和、そして環境問題の改善に寄与する可能性があるとされている。MaaS を実現するにあたって、宇都宮市が特に注目しているのが、ネットワーク型コンパクトシティである。

ネットワーク型コンパクトシティとは、都市内の多様な魅力を複数の拠点として集約し、利便性の高い公共交通を中心とする多様な交通手段で連携した都市のことである。

ネットワーク型コンパクトシティのメリットは、公共施設や商業施設が一定の地域に集中するため、アクセス時間が短縮し、生活の質が向上することである。宇都宮市では、ネットワーク型コンパクトシティの形成に向け、土地利用の適正化、拠点化の促進、ネットワーク化の促進[1]を目指している。

本提案では、MaaS をより効果的にするネットワーク型コンパクトシティの形成に向けて、現実的な要素を考慮した交通ネットワークの設計を行う。

### 2. 提案の目標・課題「まちに広がる共創の輪～新たな価値の創造を目指して～」と

#### の関連

##### 1. 共創の促進:

- この提案では、産官学が連携して交通サービスを提供することを可能としている。

## 2. 多様なステークホルダーの参加

- 交通ネットワークの設計には、大学、地域団体、民間事業者など多様なステークホルダーが関与できる。これにより、異なる視点やアイデアが集まり、新たな価値を創造する土壌が整う。

## 3. 持続可能な社会の実現

- OD フローに基づく交通ネットワークは、地域の実情に即した効率的な移動手段を提供し、公共交通機関の利用促進に寄与する。これにより、交通渋滞の緩和や環境負荷の軽減が期待でき、持続可能な地域社会の実現に貢献する。

# 3. 現状分析

## 3.1 宇都宮市の課題

### (1) 人口減少・少子高齢化

図1<sup>(2)</sup>、図2<sup>(2)</sup>は宇都宮市の人口推移と人口ピラミッドを示した図である。こちらを見ると分かるように、宇都宮市では今後人口減少と少子高齢化がさらに進む。これらの問題は、地域の活力や持続可能性に直接的な影響を及ぼす。よって、これらの問題に対処するために、持続可能な街づくりがますます重要になる。

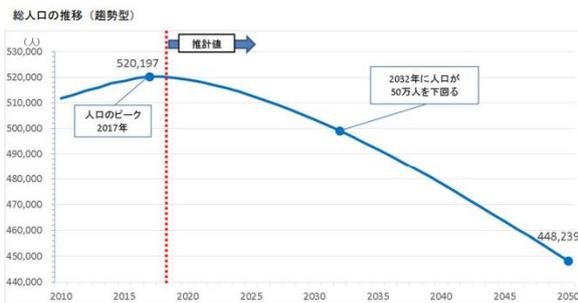


図1 人口推移<sup>(2)</sup>

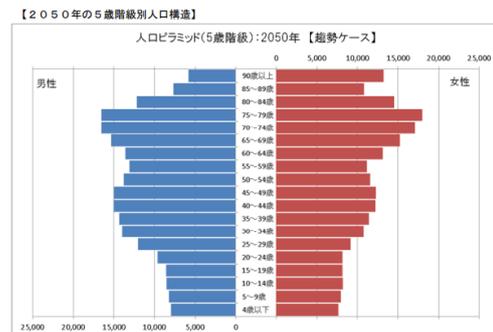


図2 人口ピラミッド<sup>(2)</sup>

### (2) 自動車依存

表1 栃木県の交通に関する値<sup>(3)</sup>

自動車保有台数 (人口100人あたり)	65.95台 (日本3位)
自家用車保有台数 (世帯あたり)	1.628台 (日本5位)
乗り合いバス輸送量 (人口1人あたり)	8.63人 (日本39位)

表1は栃木県の交通に関する値である。この表を見ると、自動車保有台数が高く、バス輸送量が低い、つまり、栃木県全体として自動車に頼っている自動車依存の状態であることが分かる。さらに、この自動車依存が原因で起きる自動車渋滞も、市民の生活満足度を下げる要因となっている。

### (3) 公共交通機関の利用者減少

自動車依存の高まりによる公共交通利用者の減少

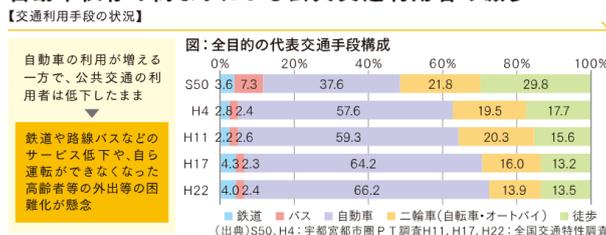


図1 公共交通利用者の減少<sup>(4)</sup>

栃木県において公共交通機関の輸送人員は平成 29 年には、昭和 44 年のピーク時から約 86% 減少しており、公共交通離れが加速している。これにより公共交通維持のための公費負担が膨らみ、県や市の財政を圧迫している。図 3 は宇都宮市の代表交通手段構成の推移を示した図である。これを見ると年々自動車の割合が増えていることが分かる。公共交通の利用者が減り、交通事業者の収益が減りサービスが悪化、すると益々利用者が減る、という負のスパイラルに陥っている。

### 3.2 宇都宮市の取り組み

#### ネットワーク型コンパクトシティ

宇都宮市はネットワーク型コンパクトシティ形成に向けた取り組みを行っている。2023 年 8 月に新規開業した LRT はその代表的な例である。時間が正確で利用しやすい LRT によって新しい人の流れを作り、少子高齢化や人口減少が進む中でも、誰もが公共交通と車を上手に使い分けながら便利に暮らせる街を目指している。LRT とバス・地域内交通などが連携したネットワークをさらに充実させることで、公共交通での市内の移動をスムーズにさせ、街の魅力を上げる施策に取り組んでいる。

### 3.3 本提案の位置づけ

本提案は、宇都宮市が目指している、ネットワーク型コンパクトシティに向けた交通ネットワーク設計を、学問的な視点から議論し、未来の街づくりの検討材料となることを目的に提案を行っている。これにより、交通事業者・市・大学の共創が可能となり、新たな価値を生み出すことが期待できる。

## 4. 施策事業の提案

### 4.1 本提案での交通ネットワーク設計手順

本提案の設計手順は大きく二段階ある。

1. 交通ネットワークのハブ配置
2. 交通ネットワークのバス路線設計

交通ネットワークのハブ配置では、各拠点の乗り換え地点となる交通ハブの配置を行う。交通ネットワークのバス路線の設計では、配置した各交通ハブ同士を結ぶバス路線を設計する。この流れに沿って、宇都宮市における交通ネットワーク設計を行う。

### 4.2 交通ネットワークのハブ配置

交通ネットワークのハブ配置とは、ハブとなる地点を選択することである。ハブとは、駅や停留所など交通機関の乗り換え施設を機能として持つ地点を指す。ハブを配置することで、地域内の拠点同士を結び、ネットワーク型コンパクトシティの形成に寄与する。

ハブ配置は、「どこにハブを配置すれば市民が最も効率よく公共交通を利用できるか？」という考えのもと、既存の駅や LRT の停留所などの現実的な要素も考慮しつつ、交通ハブの配置場所を数学的に求める。ハブ配置は以下のように定式化する。

こちらは数理最適化問題の一種である。数理最適化問題とは、特定の条件や制約のもとで、最も良い解を見つけるための問題である。具体的には、目的関数と呼ばれる数値を最大化または最小化することを目指す。例えば、コストを最小限に抑えたり、収益を最大化したりすることが考えられる。

本提案では、数理最適化問題の一種である施設配置問題を解く。施設配置問題は、特定の資源（施設やサービスなど）をどのように配置すれば、コストや距離を最小限に抑えたり、サービスの効率を最大化したりできるかを考える問題である。例えば、工場や倉庫、病院などの位置を決定する際に、顧客や需要地との距離が重要な要素となる。この問題は、実際のビジネスや交通、物流などさまざまな分野で利用されており、効率的な資源の配置を実現するために非常に重要である。分かりやすく言えば、「どこに何を置けば、一番良い結果が得られるかを考える問題」と言える。この問題をハブ配置に応用することで、配置場所を決定している。本提案では、あらかじめ指定した施設の中で、どの施設をハブとすれば全市民の移動距離の合計値が最小になるかを見

つける。これにより、ネットワーク型コンパクトシティにおける最適な乗り換え地点を求めることができる。

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{m=1, \dots, M} A_m^{(n)} \sum_{h=1, \dots, H} D_{m,h} \cdot u_{m,h} \\
 \text{s. t.} \quad & \sum_{h=1, \dots, H} u_{m,h} = 1, (m = 1, \dots, M) \\
 & u_{m,h} \leq v_h, (m = 1, \dots, M) \\
 & \sum_{h=1, \dots, H} v_h = p \\
 & D_{h_1, h_2} \geq 2,000 [m] \\
 & u_{m,s} = 1, (s \in h)
 \end{aligned}$$

ただし、

$A_m^{(n)}$	メッシュ $m$ の夜間人口 [人]
$D_{m,h}$	出発地メッシュ $m$ の中心点とハブの候補点 $h$ の道路距離 [m]
$u_{m,h}$	メッシュ $m$ に住む人が、ハブの候補点 $h$ を利用するかしないかのバイナリ変数
$u_{m,s}$	メッシュ $m$ に住む人が、既存の駅や LRT の停留所 $s$ を利用するかしないかのバイナリ変数
$v_h$	ハブの候補点 $h$ がハブに選ばれるかのバイナリ変数
$p$	ハブ数
$D_{h_1, h_2}$	各ハブ同士の道路距離 [m]

である。

図は配置された結果である。

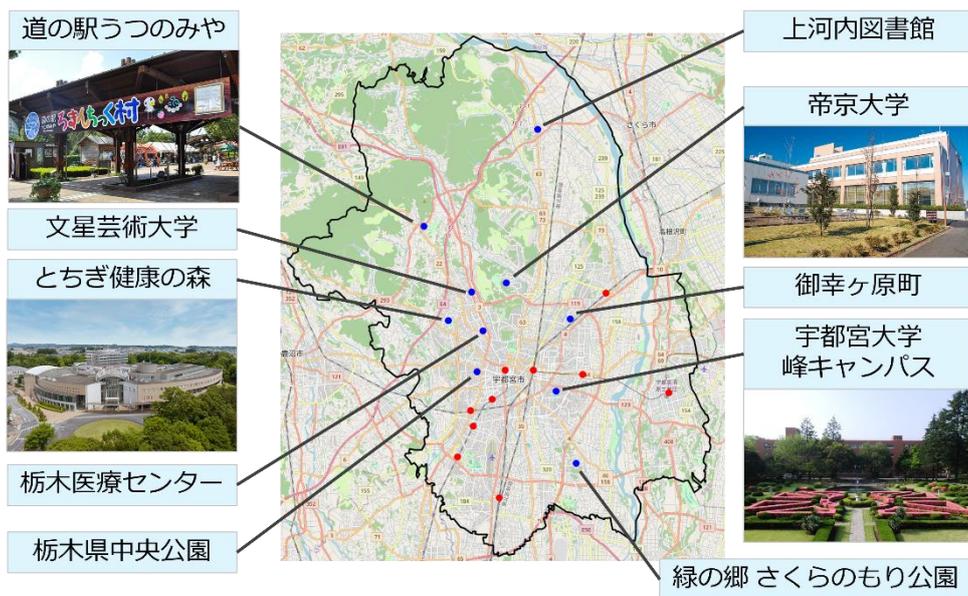


図 2 ハブ配置の結果

#### 4.3 交通ネットワークのバス路線設計

### (1) バス路線の設計手順

バス路線の設計は以下の流れで行う。

1. OD フローの算出
2. 各ハブ同士を結ぶバス路線の設計
3. バス路線の選択

### (2) OD フローの算出

OD (Origin Destination) フローとは、出発地から目的地までの移動需要のことを指す。OD フローの算出では、全 500m メッシュのペアごとの OD フローを算出する。この時、出発地メッシュは夜間人口が多いほど出発する OD フローは多い、目的地メッシュは昼間人口が多いほど到着する OD フローは多い、という想定のもと、以下の式で推定を行う。

$$F_{i,j} = A_i^{(n)} \cdot \mu_{i,j} \cdot \left( \frac{A_j^{(d)}}{\sum_{k=1, \dots, M} A_k^{(d)}} \right)$$

$F_{i,j}$	出発地 メッシュ $i$ と目的地 メッシュ $j$ 間の OD フロー [ トリップ / 日 ]
$A_i^{(n)}$	出発地メッシュ $i$ の夜間人口 [ 人 ]
$\mu_{i,j}$	出発地 メッシュ点 $i$ と目的地メッシュ点 $j$ の距離におけるトリップ原単位 [ トリップ / ( 人・日 ) ]
$A_j^{(d)}$	目的地メッシュ $j$ の昼間人口 [ 人 ]

トリップ原単位とは、1人が1日あたりに行う平均トリップ数のことで、1日に平均で何回移動するかを表す指標である。トリップ原単位とは、1人が1日あたりに行う平均移動回数を指す。トリップ原単位は移動距離によって異なる。このトリップ原単位を用いることで、実際の移動回数を考慮に入れ、その結果、OD フロー（移動需要）を算出することが可能となる。

つまり、上記の式では、Aに住んでいる人たちがどの程度Bに行くのかを算出している。さらに具体的に言えば、Aに住む人の人口 × A から B までの距離における1日の平均移動回数 × B の需要の大きさという形で表される。図5はODフローの算出結果である。出発地と目的地を線で結び、赤に近づくほどODフローが高くなる。図5を見てみると、JR 宇都宮駅を中心に東西の移動パターンが多く見られた。市の中心部を見てみると、南北での移動パターンが見られ、東武宇都宮駅周辺に目的地が集まっていることが分かる。全体的に見てみると、市北側ではあまり移動が見られず、市南側での移動が集中していることが分かる。さらに、交通路線に沿った OD フローが多くなっていることも同様に見てとれる。

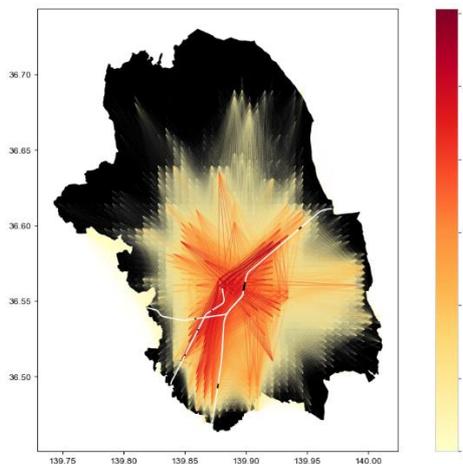


図 3 OD フローの算出結果

### (3) 各ハブ同士を結ぶバス路線の設計

OD フローの推定の次は、バス路線の設計を行う。ここでは、宇都宮市の道路ネットワーク上において各交通ハブを結ぶ複数のバス路線を設計する。実際の道路上でバス路線を設計することで、より現実的な交通ネットワークを構築することができる。本提案は、ネットワーク型コンパクトシティのための交通ネットワーク設計に関するものであり、各拠点を結ぶバス路線を主要な道路で設計するために、宇都宮市全体の道路ネットワークから主要道路のみを対象に議論を進める。



図 6 宇都宮市全体の道路ネットワーク



図 7 主要道路を抽出した道路ネットワーク

設計では、ハブのペアごとに  $k$ -最短路問題と呼ばれる問題を数学的に解くことで、各ハブのペアに対して 10,000 本の路線を設計する。ただし、この際に、すでに鉄道で結ばれている駅間（例：宇都宮駅と鶴田駅）のハブペアは除外することで、鉄道ネットワークとの連携を可能にする。このアプローチにより、多様な路線を設計することができる。図 7 はバス路線の設計結果である。

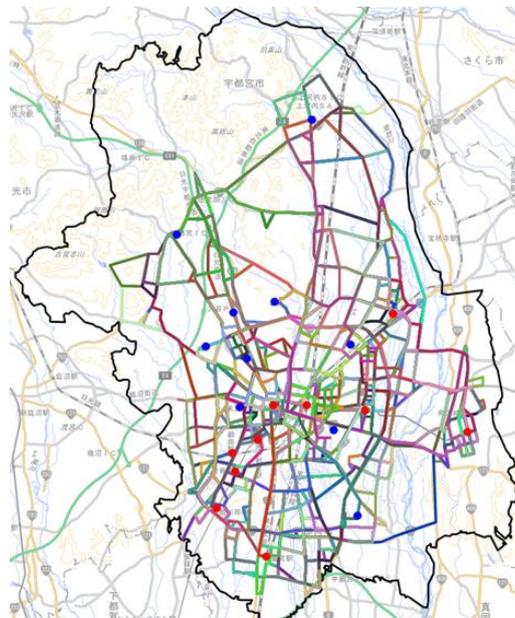


図 7 バス路線の設計結果

#### (4) バス路線の選択

最後にバス路線の選択をする。ここでは、先ほど設計したバス路線の中から、数学的にバス路線を選択し、組み合わせていく。路線選択の際には、遺伝的アルゴリズムを用いて各路線を組み

合わせ、全体の交通ネットワークを設計する。

### 目的関数

目的関数は、獲得した OD フロー量と路線ポイントをそれぞれ 0 から 1 の範囲に正規化したものの積を最大化することである。この目的は、できる限り多くの OD フローを獲得し、主要な道路を走る路線を選択して交通ネットワークを設計することにある。

### 制約条件

1. 総路線長制約：総路線長は、許容される最大の路線長以下でなければならない
2. ハブペア制約：各ハブペアには、路線は 1 本までしか存在できない

このように、目的関数を最大化しつつ、設定した制約条件を守ることで、効率的なバス路線網を設計することができる。

### バス路線の選択結果

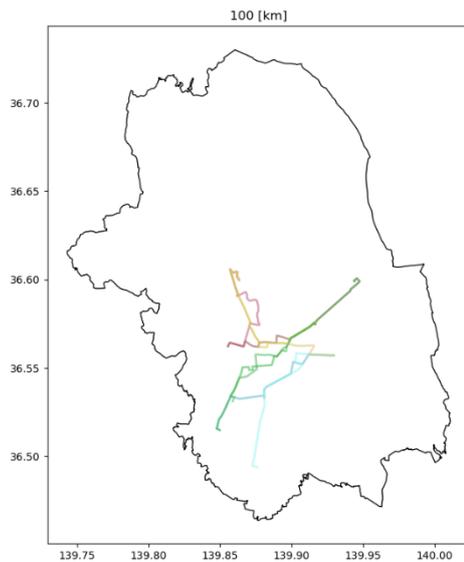


図 8 制約条件 100 [km]

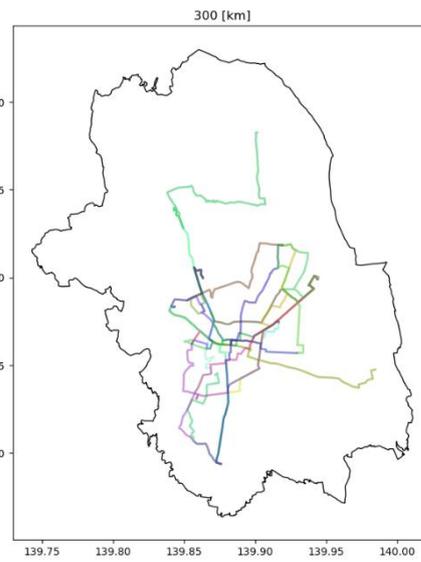


図 9 制約条件 300 [km]

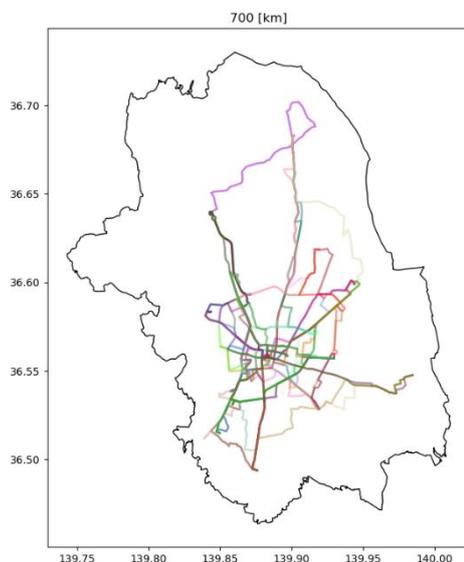


図 10 制約条件 700 [km]

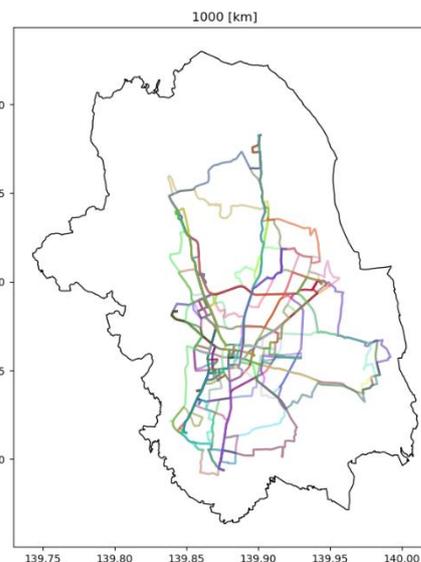


図 11 制約条件 1000 [km]

図 8 ~ 図 11 は制約条件ごとのバス路線の選択結果である。図を見ると、このようにパラメータを変えることによって、得られる結果が異なる。

### 既存のバス路線との比較

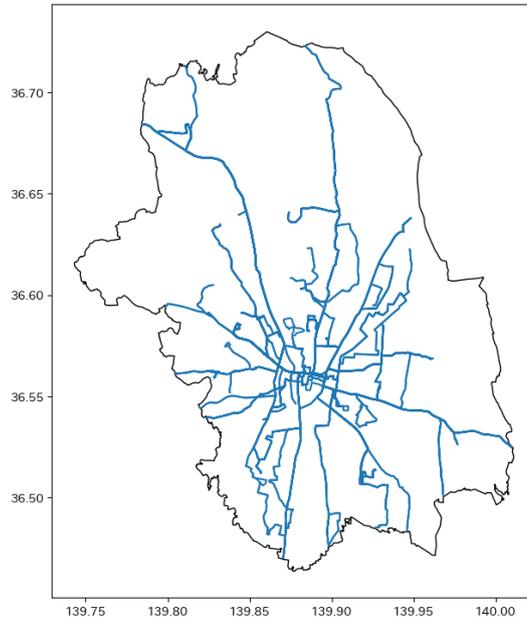


図 12 既存のバス路線

図 12 は既存のバス路線図である。既存のバス路線での、1 [km] あたりの獲得 OD フロー量は、4.2 [Trips/day/km] であった。それに対し、本提案で設計した路線の 1 [km] あたりの獲得 OD フロー量は、制約条件が 100 [km] の時 41.49 [トリップ/日/km]、制約条件が 1000 [km] の時 17.44 [トリップ/日/km] と、どの路線長で見ても、既存のバス路線よりも大幅に効率が良い路線を設計できるという結果になった。

#### 4.4 本提案での共創と協業

本提案では、ネットワーク型コンパクトシティ形成に向けた交通ハブの選定とバス路線の設計を行った共創と協業の案としては、例えば、交通ハブとなる施設に市民の憩いとなる場所を併設することで、市民の外出・交流が増え、新たな需要が生まれ、交通ハブ周辺に新たな商業施設が建設され、その結果経済の活性化を促進する効果が生まれる、ということが考えられる。他にも、本提案で設計したネットワークで MaaS を提供すると、市民の交通手段が多様化し、移動の自由度が増す、その結果、交通弱者の方も生活がしやすくなり、最終的に市民に優しい街になるというような効果も期待できる。

#### 【参考文献】

- [1] 宇都宮市：ネットワーク型コンパクトシティ，宇都宮市公式 Web サイト，<https://www.city.utsunomiya.lg.jp/shisei/machi/1034530/1007653.html>，令和 6 年 3 月 8 日。  
(令和 6 年 11 月 20 日)
- [2] 宇都宮市：宇都宮市人口ビジョン，宇都宮市公式 Web サイト，[https://www.city.utsunomiya.lg.jp/res/projects/default\\_project/page/001/022/451/jinkoubijon.pdf](https://www.city.utsunomiya.lg.jp/res/projects/default_project/page/001/022/451/jinkoubijon.pdf) (令和 6 年 11 月 20 日)
- [3] 栃木県県土整備部交通政策課：栃木県の公共交通の現状と課題，国土交通省，<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/soukou-magazine/1908-3sougoukoutsu.pdf>，令和元年 8 月 9 日 (令和 6 年 11 月 20 日)
- [4] 宇都宮市：目指すまちの姿とまちづくりの効果，芳賀・宇都宮 LRT 公式ホームページ，<https://u-movenext.net/future/>，(令和 6 年 11 月 20 日)