

# 常総市予約型乗合交通の最適化に関する研究

国立大学法人筑波大学・常総市 共同研究  
研究成果報告書

平成31年3月

筑波大学システム情報系・常総市

## 研究概要

本研究では常総市における公共交通であるデマンド型交通「ふれあい号」を対象に、(1) GIS を用いた地域公共交通利用状況の把握、(2) デマンド型交通利用データを用いたバス路線網構築、(3) 人口・施設データによる需要の推計とバス・デマンド型交通のベストミックス分析を行い、公共交通体系の方向性を探るための基礎的知見を得た。

### (1) GIS を用いた地域公共交通利用状況の把握

常総市の公共交通に係る地理情報データベースおよび統計情報を整備し、デマンド型交通「ふれあい号」の利用実態を把握した。ふれあい号の1トリップは平均6km程度となっていて最も頻度の多い距離は約3kmとなっているが、水海道地区と石下地区間の利用が多く、固定路線によるカバーはある程度の路線長が必要であることが明らかとなった。

### (2) デマンド型交通利用データを用いたバス路線網構築

デマンド型交通の運行実績データを用い、市中心部の水海道地区を対象に利用者により多くカバーできるバス路線の構築を数理計画問題によって求め、水海道地区の中央部から南部、西部、北部の順番で優先されて路線が設定されることを明らかにした。また、路線長1kmで捕捉するODフロー量の観点から、最も効率的な路線のパターンとその効果について定量的に示した。

### (3) 人口・施設データによる需要の推計とバス・デマンド型交通のベストミックス分析

500mメッシュ別の人口データ、病院、大型小売店データを用いてODフローデータを推計し、それを元にバス路線の起終点の決定、路線網の構築、バスがカバーされない範囲を運行するデマンド型交通の走行距離と車両台数を分析した。路線の効率性に関しては、重要度の高い地点が南北離れて分布し、途中に空白地帯がある常総市では最大効率の35kmで日当たり41人程度の利用に留まった。そのため、デマンド型交通との提供バランスを運行コストの面で検討した場合、併用の効果は僅かであり、デマンド型交通の運行に必要な諸経費を考慮するとデマンド型交通単独の交通体系が望ましいことを示した。

## 目次

第1章	はじめに.....	3
1.1	研究の背景.....	3
1.1.1	社会構造の変化と地域公共交通の現状.....	3
1.1.2	地域公共交通の重要性と我が国の取り組み.....	5
1.1.3	多様化する地域公共交通手段.....	7
1.1.4	地域交通手段別の長所・短所の整理.....	10
1.1.5	地域公共交通システムの適正化.....	10
1.2	研究の目的.....	12
第2章	常総市デマンド型交通の運行状況.....	13
2.1	常総市デマンド型交通の概要.....	13
2.2	運行データを用いた OD 分析.....	17
第3章	OD フロー捕捉からみたコミュニティバス路線の適正化とデマンド型交通との併用に関する効果分析.....	20
3.1	モデルの構成.....	20
3.2	各モデルの定式化.....	21
3.2.1	起終点ハブの配置.....	21
3.2.2	バス路線網の構築.....	22
3.2.3	デマンド型交通配車・配送方法の決定.....	24
3.3	常総市デマンド型交通運行データを用いたバスルート設計.....	26
3.4	人口・施設分布を用いた路線網の構築とデマンド型交通とのベストミックス分析	29
3.4.1	OD フローデータの推計方法.....	29
3.4.2	常総市における OD フローデータ.....	31
3.4.3	路線網構築結果.....	34
3.4.4	デマンド型交通の運行効率評価.....	38
3.4.5	経済性指標からみたバス・デマンド型交通の提供バランス.....	40
第4章	おわりに.....	42
4.1	本研究のまとめ.....	42
4.2	今後の課題.....	43
参考文献	.....	44

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 社会構造の変化と地域公共交通の現状

我が国における1960年代からのモータリゼーションの進展は、特に地方部によって顕著に表れており、三大都市圏以外の地方部においては一人一台自動車を所有しても珍しくない。人々に自家用車が普及するとともにバスをはじめとした短距離の移動を目的とした地域公共交通は利用者の減少が進み、サービス水準の低下をもたらしている。特に、2002年の規制緩和によって地域の足となる路線バスの参入・撤退の自由化が行われたが、結果として撤退するケースが増加し、多くの公共交通空白地帯が発生した。加えてロードサイドショップの立地に代表されるようにモータリゼーションに適応した都市構造への変化、および少子高齢化、人口減少といった人口構成の変化により、その低下を加速させ、負のスパイラルに陥っている状況が見られる。しかし(秋山・中村(2000))でも述べられているように、モータリゼーションの進行は渋滞や交通事故、大気汚染や騒音、振動などの局地環境問題、地球環境問題への影響など様々な問題が生じる事が示されている。

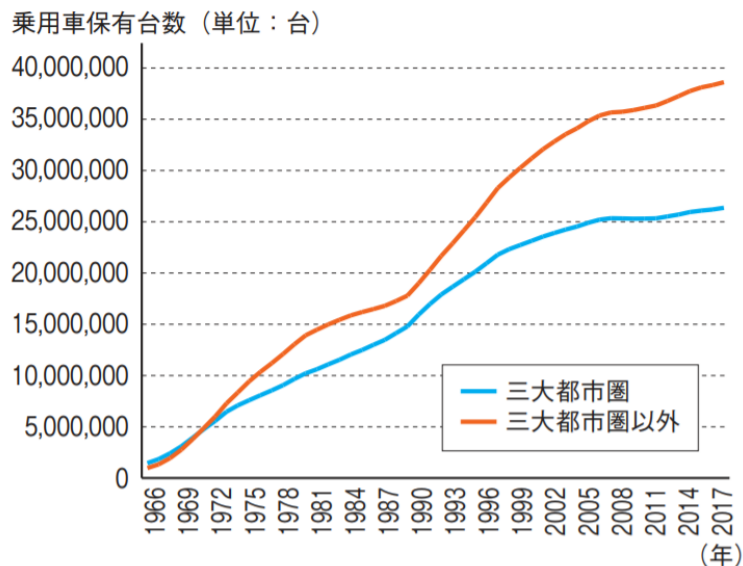


図 1.1 乗用車保有台数の推移

(出典: 国土交通省 2017年度交通政策白書)

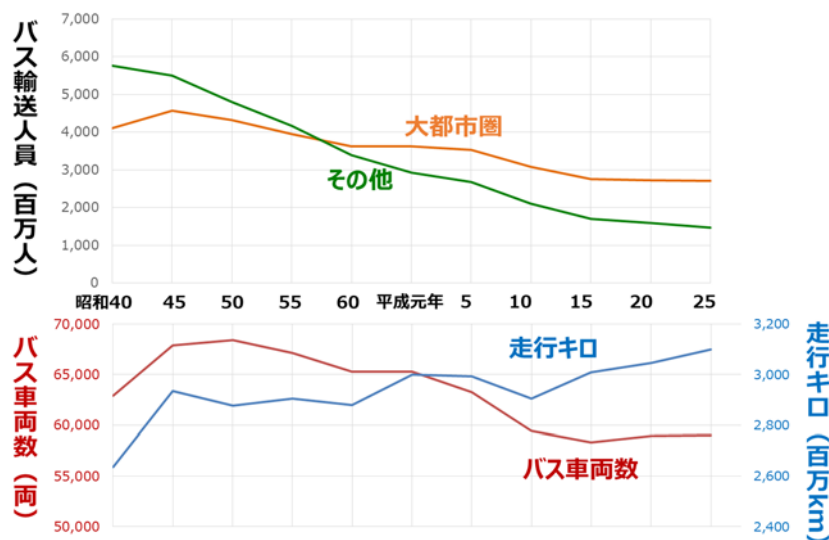


図 1.2 バス輸送人員とバス車両数、走行距離の推移  
(出典：国土交通省旅客課 バスの車両数、輸送人員及び走行キロ)



図 1.3 人材難に困窮する路線バス事業者  
(出典：日本経済新聞 2018年3月26日号)

さらに、人口構成の変化は利用者への影響だけでなく運転手の不足をもたらしている。図 1.2 下においてバス走行キロとバス車両数の関係を示しているが、走行距離は増加しているのにもかかわらずバス車両は減少傾向であることから、車両不足により台あたりの走行距離が長くなっていて、車両もしくは運転手が不足傾向にあることがわかる。事実、図 1.3 に示すように運転手不足に困窮する運行事業者は全国に存在する。

### 1.1.2 地域公共交通の重要性と我が国の取り組み

一方で、地域公共交通手段の維持・改善は地域のモビリティの確保だけでなく、健康、福祉、観光、環境など様々な効果をもたらすとされている。(秋山・中村(2000))

特に近年、高齢者の増加に伴い免許返納者が増加していることから、自動車を利用できない交通弱者とのモビリティ格差の広がりには深刻な問題となっている。

ここで、地域公共交通に関する我が国の施策について整理する。

表 1.1 地域公共交通に関する我が国の施策

年度	施策	概要
2002	乗合バス規制緩和	新規参入による競争原理の誘因を目的としたが、結果的に不採算路線の廃止が加速
2006	道路運送法 改正	不定路線である区域運行の認可が開始され、乗合タクシーサービス(デマンド型交通)の導入が開始
2007	地域公共交通の活性化及び再生に関する法律施行	「地域公共交通総合連携計画」の作成 市町村を対象に地域主体の地域公共交通の活性化・再生を支援する枠組が整備されたが、「廃止バスの代替コミュニティバスへの補助」といった局所的な対応に留まり、まちづくり・観光振興などとの一体的な取り組みが不十分
2013	交通政策基本法 施行	交通政策に関する基本的な理念、国や自治体の役割を明確化
2014	地域公共交通の活性化及び再生に関する法律改正	「地域公共交通網形成計画」の作成 単独市町村→複数市町村・都道府県も対象になり、まちづくり・観光振興との連携が明確化 面的な公共交通ネットワークの再構築

国として本格的に地域公共交通の活性化に取り組み始めたのは2007年の地域公共交通の活性化及び再生に関する法律の施行からである。当該法律の下、地域公共交通総合連携計画が全国で作成され、その中にデマンド型交通の導入について盛り込まれるケースも存在した。その後法律が改定され、連携計画を発展させる形となった「地域公共交通網形成計画」(以下、網形成計画)の策定が全国で進められている。

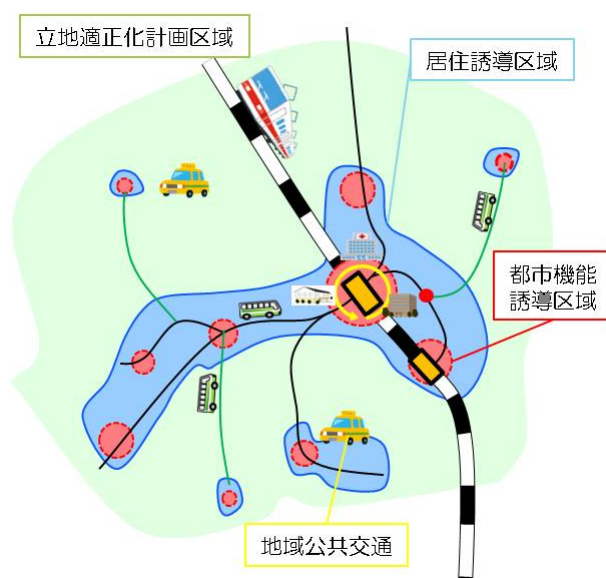


図 1.4 立地適正化計画のイメージ  
 (出典：国土交通省 立地適正化計画の意義と役割)

各居住地域と目的地となる都市内の施設とを網羅的・効率的にカバーすることを目標とした網形成計画に併せて、スプロール化によって分散してしまった都市構造を集約し、目的地となる居住機能、公共施設の誘導を行う立地適正化計画によって、「コンパクトシティ・プラス・ネットワーク」型の都市構造の構築が推進されている。網形成計画策定にあたって設立される地域公共交通の法定協議会（多くの自治体は地域公共交通活性化協議会と称す）は、大きく分けて利用者、運行事業者・設備管理者、地方公共団体に分類される関係者で構成されて開催される。各関係者の分類とその役割、目的を整理したものを表 1.2 に示す。

利用者は目的地まで便利に安く行ける交通手段、交通事業者にとっては安全・円滑に運行ができ、収益性になるべく高い交通手段を目指す。そして、それらの意見、および他の利害関係者の意見を統合し、意思決定・事業の遂行を行うのが自治体となるが、利用者の意見を鵜呑みにして公平で満遍ないサービスを実現した場合、運行にかかるコストは上昇してしまうため、すべてを鵜呑みにすることは出来ない。加えて交通事業者からは近年の運転手不足によって車両に関する制約が高まり、サービス策定に関する自由度が低下している。他にも他市町村との間を結ぶ路線の構築の場合には接続先の市町村の意見も加味する必要もあるなど、様々な点を考慮した上での意思決定が自治体には求められるため、非合理的な計画策定が行われている可能性がある。

表 1.2 協議会の構成員とその役割・目的  
 (国土交通省 (2016)「地域公共交通網形成計画及び地域公共交通再編実施計画作成のための手引き」を参考に筆者作成)

	役割	目的
利用者	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 公共交通づくりに対する主体性の向上</li> <li>➤ 利用促進</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 目的別 (通学・通勤・私事) における利用可能性</li> <li>➤ 運行におけるサービスレベル (運行頻度・快適性) 向上</li> <li>➤ 乗降施設のサービスレベル (バス停, 乗換施設の快適性) 向上</li> <li>➤ 運賃の削減</li> </ul>
運行事業者 設備管理者	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 計画推進上必要となる対策の検討・実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 運行実現性 (停留所の配置, 走行環境の確認)</li> <li>➤ 車両・人員の配分</li> <li>➤ 収益性の確保</li> <li>➤ 既存サービスとの競合性</li> </ul>
自治体	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 計画の策定主体</li> <li>➤ 他市町村間, 都道府県, 庁内, ほか関係者間の連携・調整</li> <li>➤ 必要となる対策の検討</li> <li>➤ 合意された事業の実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 住民の利用可能性</li> <li>➤ サービスレベルの公平性</li> <li>➤ 運行コスト削減</li> <li>➤ 利用者数増加</li> <li>➤ 上位計画 (都市計画マスタープラン, 総合計画等) との関係性</li> </ul>

### 1.1.3 多様化する地域公共交通手段

また, これまで地域公共交通と言えば, 地下鉄, 路面電車, バス, タクシーが主なものとして普及しており, 特にバスが短距離を移動する上で代表的な公共交通であった. しかし前述のとおり近年ではバスの利用者減少が全国的な課題となっており, バスよりも小規模で, かつタクシーよりは公共交通としての要素が強いデマンド型交通の導入が進むなど, 多様化が進んでいる.

デマンド型交通 (DRT : Demand Responsive Transit)とは, 明確な定義が有るわけではないが, 一般的には図 1.5 のように複数の利用者の移動に関する要望 (時刻, 行先) に応じそのつど運行経路や時刻表を決定し運行する交通手段である. 利用客は電話などによって事前の予約を行い, その予約から運行ルート, 到着時刻などのダイヤを設定する公共交通の一つの形態である.



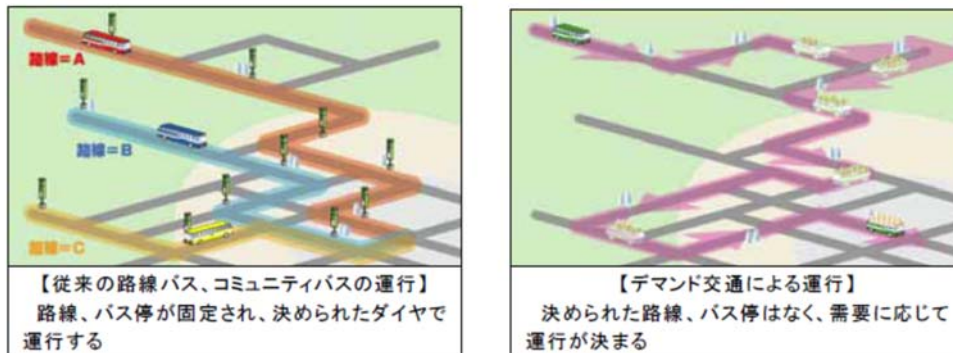


図 1.5 路線バス、コミュニティバスとデマンド交通の違いの概念図  
(出典：[国土交通省自動車交通局旅客課 (2009)])

表 1.3 デマンド型交通の過去の事例  
(出典：[秋山, 吉田, et al. (2009)])

地域	年代	名称	導入目的/運行上の特徴	
			導入地域・対象利用者	運行上の特徴
北米	1900-	ジトニー	都市内の移動	利用者の需要に応じて運行車両数を変化。利用者は利用時に呼び止め
	1960-	ダイアル・ア・ライド	高齢者・障害者等の移動制約者や、低所得者層へのモビリティ提供	利用時に電話で予約
	1970-	乗合タクシー	郊外鉄道駅～居住地、商業地域～空港等、特定2点間でのタクシー相乗り	利用時の呼び止め、起終点乗場での乗合乗車
		通勤送迎バス 自家用車乗合	朝夕ピーク時に起こる道路混雑の緩和を目的に相乗りを推進	事前に登録した会員の自宅の前から勤務地までの戸口間のサービス
欧州	1970-	ダイアル・ア・ライド	既存公共交通適用が困難な郊外地域や過疎地域での地域内トリップを対象	利用者の予約に応じ路線・時刻表を柔軟に設定。電話による予約
	1990-	デマンド型交通		ITS技術を適用し、予約に応じ運行。電話・インターネットでの予約
日本	1970-	デマンドバス	郊外地域や過疎地域で既存公共交通の運行が困難な地域での移動を対象	利用者の予約に応じ運行経路や時刻表を設定。電話やキオスク端末での予約
東南アジア	1900-	パラトランジット	固定路線(もしくは一部の迂回経路)に沿い需要の変化に応じ運行	呼び止めによる利用

デマンド型交通は古くはアメリカのジトニー、東南アジアのパラトランジット等路上での利用者の呼び止めに応じて乗降を取り扱うサービスが存在する(表 1.3)。1960～70年代から欧米諸国で「ダイアル・ア・ライド(Dial-a-Ride)」やDRTの名称で導入され、その後1972年に大阪府能勢町で「デマンドバス」が初めて導入された。

そして東京・神奈川地域でも導入されたが、当時は情報技術が未発達であったため、経路選択システムに多大なコストがかかり、そのほとんどが在来のコミュニティバスなどに置き換わった。しかし近年ではバス事業の現状や情報通信技術の進展により再

びデマンド型が脚光を浴びている。しかし、[元田, 高嶋, et al. (2005)]によると、需要が大きすぎる場合、少なすぎる場合ではデマンド型交通が適用できないことが懸念されている。また、デマンド型交通は運行路線・停留所・運行ダイヤの有無によって、図 1.6 に示すように様々な運行方式が考えられる、

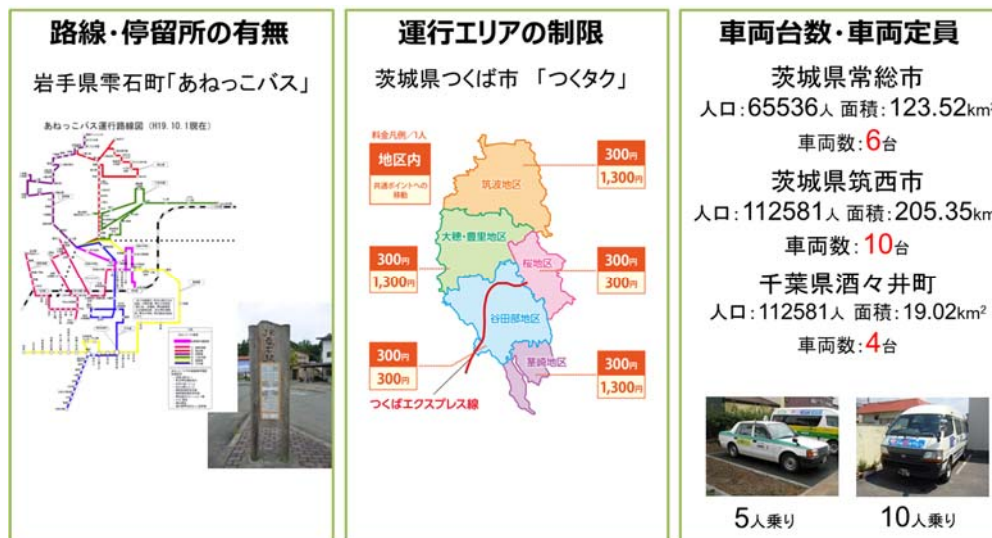


図 1.6 デマンド型交通の多様な運行方式の例

表 1.4 公共交通の分類  
(引用 [原 (2005)])

分類	内容	模式図
① 通院バス、買い物バス	起終点固定で中間停留所がほとんどなく、定時定路線で起終点を直接結んで運行する。通院、買い物、通勤などの単一の交通目的に対して、郊外の団地と市街地を結ぶような路線に適用される。	
② 路線バス	起終点を結び、その間に幾つかの中間停留所を持ち、定時定路線で運行される。様々な交通目的に対応しており、最も一般的なバスサービスである。	
③ 循環バス、スクールバス	起終点在同一で環状になった路線を持ち、その間に幾つかの中間停留所を持つ。通常の路線バスに比べて生活道路を路線としている場合が多く、小型バスを使用するケースが多い。	
④ フリー乗降バス	路線バスであるが、路線内であれば乗車の希望によって自由に乗降ができる。農村部など需要が小さく、停留所間隔が長い地域等で適用される。	
⑤ 迂回路付き路線バス	路線バスを基本に路線内に迂回路をもっている。迂回路側の停留所に需要がある時は、運転者は迂回路を通る。比較的狭い範囲を対象としていることから、到着時間の変動は小さい。	
① フレックスルート方式	起終点を結び、その間に随的に配置された停留所のうち、必要のある箇所だけ通って運行する。出発時間は決まっているが到着時間は、発生した需要の数や位置によって変動する。	
② 乗合タクシー	起終点在同一もしくは、2カ所の場合がある。出発時間が決まっているが、需要の数や位置によっては、到着時間が変動する。サービス地域内であれば乗降はドア・ツードアで輸送する。	
③ STS	起終点はなく、自宅や待機場等から最初の需要に対してドア・ツードアでサービスを実施するが、時間やルートも需要に応じて設定される。複数の需要に対して乗合的な運行を行う。	
④ フルデマンド方式	起終点や時刻表がなく、経路も自由である。随的に配置された需要対応型停留地点の間を、需要にあわせて自由に運行する。高い情報通信機能をもった予約センターが必要である。	
⑤ タクシー・有償ボランティア輸送	起終点はなく、待機所から需要に対してドア・ツードアでサービスを実施する。時間やルートも需要に応じて設定される。一般に単独の需要ごとに乗降を繰り返す。	

凡例 ■ : 起終点停留所(常にこの地点で停車)  
 □ : 中間停留所(常にこの地点で停車)  
 ● : 需要対応型停留地点(予約必要)  
 ○ : 自由停留地点(予約必要/ドア・ツードア)  
 ※フリー乗降バスについては、自由停留地点において予約不要

特に、路線・停留所などの配車の手法に着目すると、[原 (2005)]において表 1.4 に整理されている。デマンド型交通の運行タイプとしては表 1.4 の DRT と記載されるものが該当するが、大きく分けて表左側の運行する路線・停留所が固定され、停留所ごとの運行ダイヤが定められたバスに近い路線タイプと、右側の利用者の需要に合わせて経路を変更し、停留所を網羅的に配置する、もしくは定めないタクシーに近いエリアタイプに大きく分けられる。

#### 1.1.4 地域交通手段別の長所・短所の整理

表 1.5 は前述した主な都市内交通手段を定時定路線、デマンド型交通、私的交通の分け、利用者側、計画・運行側の観点から、それらの特性を概略的にまとめたものである。

表 1.5 各都市内交通手段の特性比較  
([新谷, 原田 (2017)] p106 を基に修正)

		利用者側					計画・運営側	
		速達性	快適性	機動性	低廉性	安全性	建設費 維持費	輸送 能力
定時 定路線	地下鉄	1	5	5	1	1	5	1
	新交通システム	1	5	5	1	1	5	1
	LRT	2	4	4	1	1	4	2
	BRT	2	4	4	1	3	4	2
	バス	4	4	3	2	3	3	3
デマン ド型 交通	デマンドタクシー	4	3	3	3	3	3	4
	ライドシェア	3	1	2	4	5	2	4
	自家用車有償交通	4	2	2	4	5	2	5
	タクシー	3	1	2	5	5	1	5
私的 交通	カーシェアリング	3	1	2	4	5	1	5
	自家用車	3	1	1	5	5	1	5

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

優れている
劣っている

ここから、定時定路線のうち、地下鉄、新交通システムのような大量輸送機関とカーシェアリング・自家用車のような私的交通手段が相反する関係にあり、バスやデマンドタクシー、ライドシェアがその間を埋める交通手段であることがわかる。このように、需要の密度、移動距離、定時性の重要度、低廉性などの交通需要の特性に応じて適用し易い交通手段が存在する。

#### 1.1.5 地域公共交通システムの適正化

網形成計画においても、バスやデマンド型交通などの交通手段を適切に選択し、必要に応じて組合せを行うマルチモーダルな公共交通網の構築が検討されている。図 1.7 は地域公共交通網形成計画の方向性を示した図である。乗り継ぎ向上や乗換拠点の設定などのバス交通の再編だけでなく、郊外部、山間部でのデマンドタクシー、自

家用有償旅客運送などのデマンド型交通を運行し、相互連携を取る点について記載されているが、その検討は前述の通り各地方公共団体が行うために、運行効率の悪い交通手段が導入されている可能性がある。

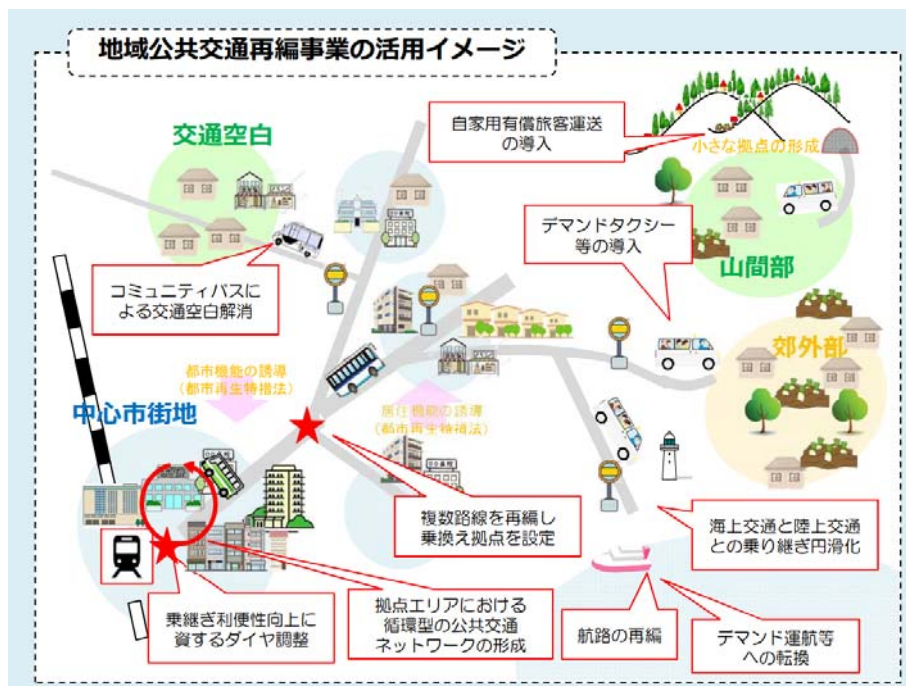


図 1.7 地域公共交通再編事業のイメージ  
(出典：国土交通省 地域公共交通活性化再生法の一部改正)

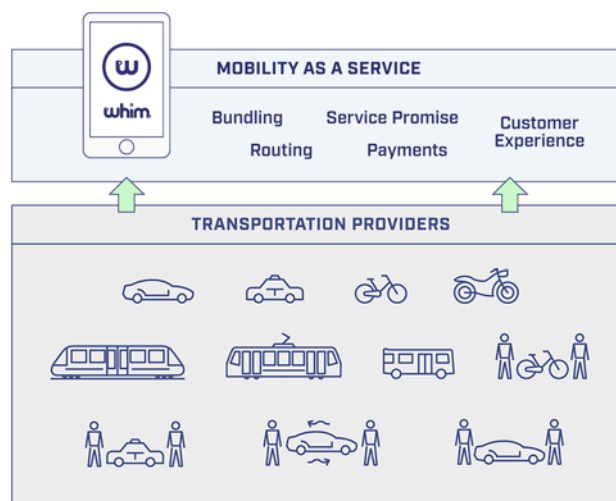


図 1.8 MaaS 概念図  
(引用：[MaaS\_Global (2018)])

そして、近年は MaaS (Mobility as a Service) という概念が世界中に広まりつつある。これまではバス、鉄道、タクシーなど、それぞれの利用ごとに料金を支払っているが、MaaS は出発地から目的地までの移動を一つのサービスとして、複数の交通手段を一体的な月額料金 (サブスクリプション方式) で利用するもので、フィンランドでは交通サービスの一体化を行っている Whim が 2016 年からサービスが開始されている。MaaS 形式においては人々のスムーズな移動を実現するにあたって、日常的な移動の需要密度あるいはその分布パターンによって、こうした交通手段を単独か、あるいは複数の手段を組み合わせることで一体的なサービスを提供している。

## 1.2 研究の目的

前節の通り人口密度が低く、目的地となる施設が散在している場合にはバス等の固定路線・固定ダイヤの交通手段よりもデマンド型交通のような非固定路線が効率的となりうるが、同程度の人口密度でも目的地となる施設が集積し、配車するポイントが限られる場合には固定路線の交通手段の方が効率的となることもありうる。

本研究では

- 1). 常総市における公共交通に係る統計情報および地理情報データベースを整備し地域公共交通体系に関するハード・ソフト情報を把握する。
- 2). デマンド型交通の運行状況と利用者データの分析を行い、地域公共交通のサービス水準の評価を行う。
- 3). 常総市のデマンド型交通の利用者データ、および人口・施設分布より推計した OD フローを対象として、バスルート設計およびバスとデマンド型交通の提供量に関して適正なバランスを求める定量的分析を行い、サービス水準を向上させるために必要な施策を明らかにする。

以上の分析によって、常総市にふさわしい公共交通の在り方を明らかにし、適切な公共交通体系の確立に寄与することを目指す。

## 第2章 常総市デマンド型交通の運行状況

### 2.1 常総市デマンド型交通の概要

常総市は面積 123.5km<sup>2</sup>・人口 60,119 人(2019 年 2 月末現在)であり、同市ではかつて無料の福祉バスを運行していたが、目的地となる施設間の行き来の不便さ、及び本数の増大によるサービスの向上を図るため、2009 年 10 月よりデマンド型交通「ふれあい号」が運行を開始している。利用者は便の出発時間 1 時間前までに予約センターに出発地・目的地を連絡し、利用する市内ならどこでも乗車・降車場所を指定できる。運行の際は、他の利用者の出発地、目的地を經由し、乗合ながら運行を行っている。



図 2.1 常総市予約型乗合交通「ふれあい号」

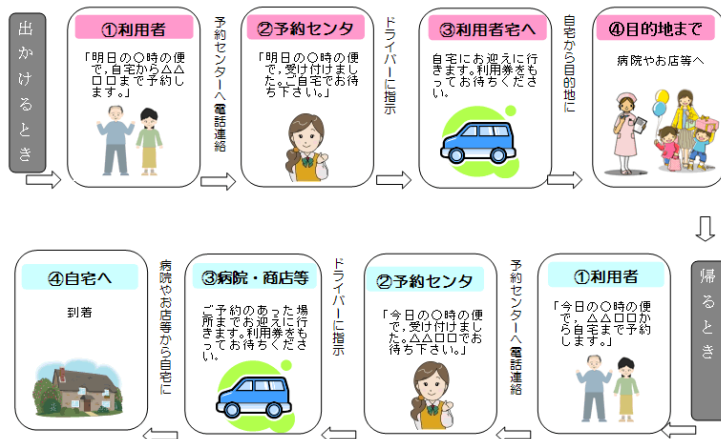


図 2.2 ふれあい号の利用方法

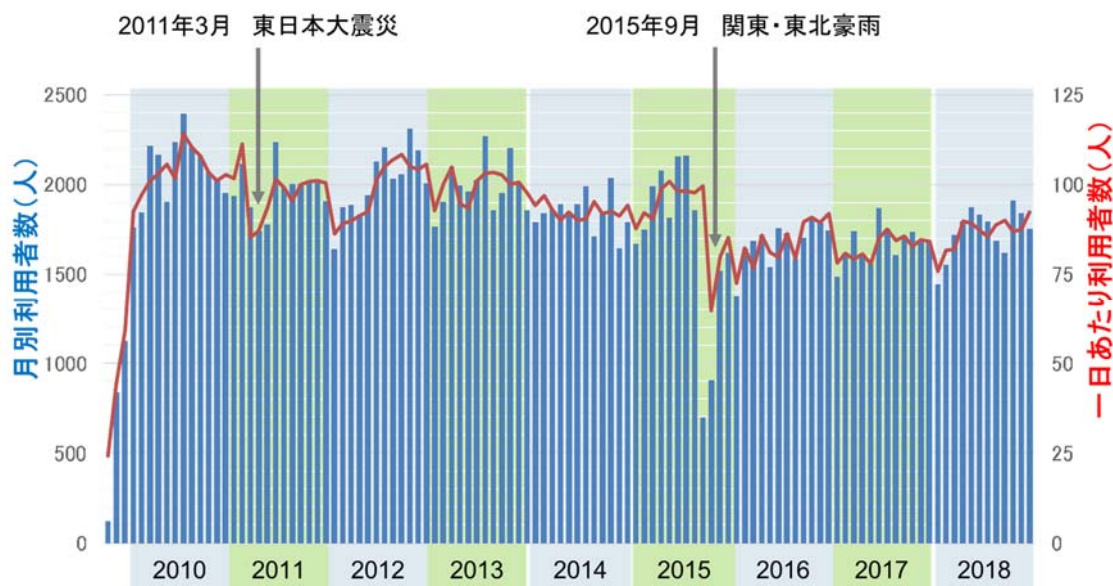


図 2.3 ふれあい号利用者の月別・一日あたり利用者数の推移



図 2.4 浸水した配車システムの設備

月別の利用者数、および一日あたり利用者数の推移を示す。青棒にて月別利用者数、赤線にて月別利用者数を運行日数で除した一日当たりの利用者数を示している。2015年以前は、東日本大震災で被災し営業が停止した施設があった影響で、2011年3月以降一時的に利用者が減少したものの、一月の利用者数は概ね2000人、一日の利用者数は100人程度で安定していた。しかし、2015年9月に発生した関東・東北豪雨に起因する水害後は利用者数大きく減少した。

2015年9月の関東・東北豪雨において常総市は、市民の避難者は1000人を超える大きな被害を受けた。この水害によってデマンド型交通の運行システム機器がある石下総合福祉センター内の予約センターも浸水し、機器の多くが水没し、2015年10月13日まで運行休止となった。その後利用者数は増加したものの、一月の利用者数1800人程度と、水害前の水準には戻っていない。

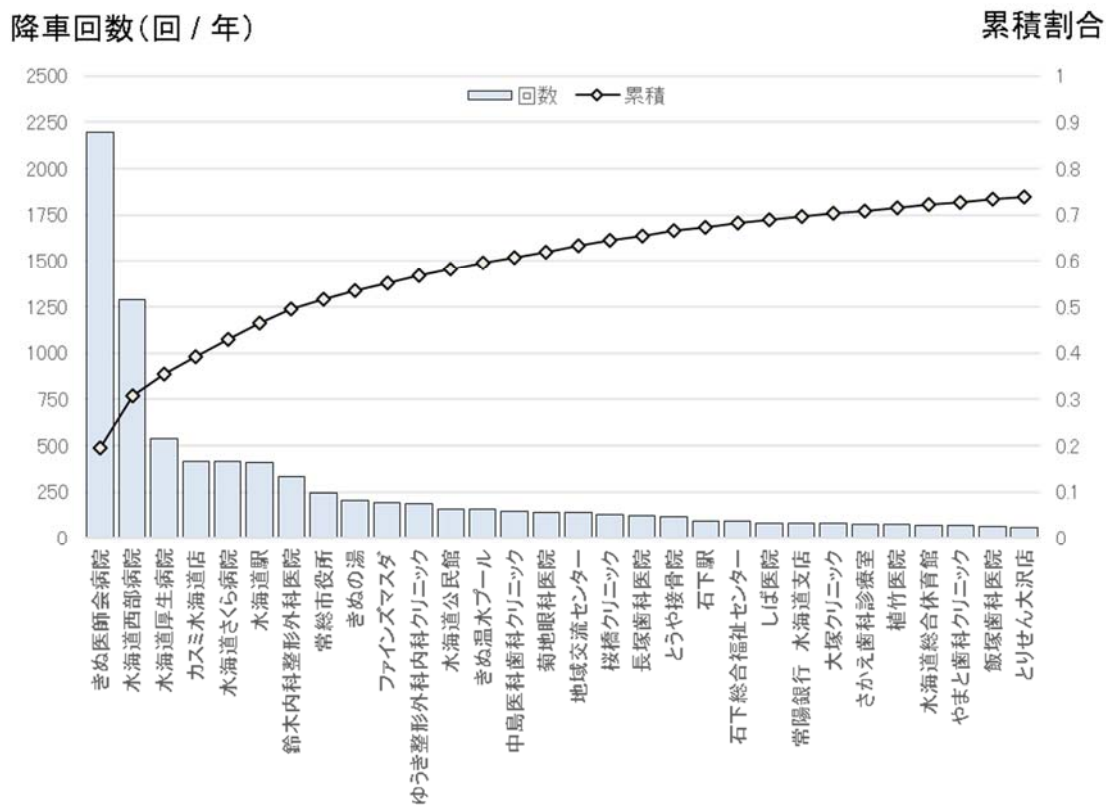


図 2.5 ふれあい号の目的施設別年間利用者数とその累積割合（2017年実績）

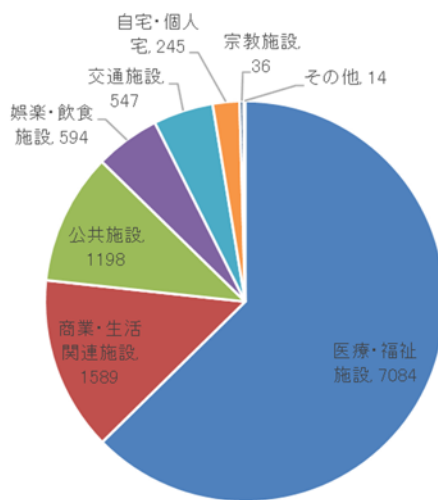


図 2.6 目的施設の種類（2017年実績）



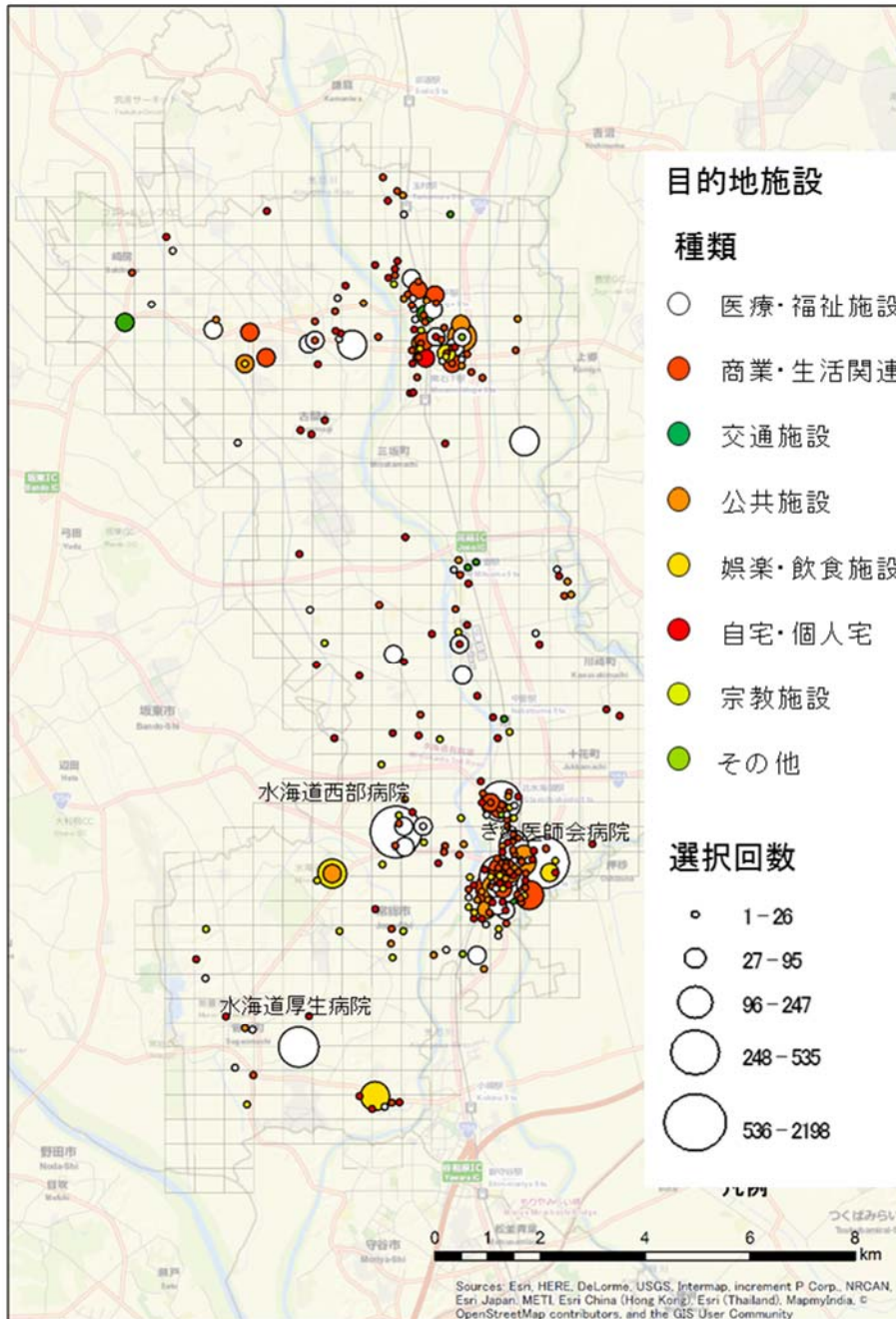


図 2.7 各施設の位置と施設の目的地選択回数

図 2.5 は 2017 年におけるふれあい号利用者の目的地として指定された回数を施設別に集計し、年間利用者数の多い順に並べたものである。併せて、その施設の利用数が利用全体の中で占める割合を加算していった累積割合、および図 2.6 に目的地施設の分類の割合を示す。最も利用者数の多いきぬ医師会病院は全体の 2 割を超え

る年間 2000 回を超える利用者がおり、次いで水海道西部病院、水海道厚生病院と医療施設が上位を占めている。そして、上位 8 施設（きぬ医師会病院から常総市役所まで）の利用が全体の 5 割を超える利用者が集中していることがわかる。施設の種別での集計結果をみると、病院等の医療・福祉施設が全体の 6 割を占め、次いで商業施設、公共施設が多いことが示されており、生活に必要な施設である医療施設、商業施設、公共施設への交通アクセスを改善することで市内のモビリティ改善に寄与できる可能性が示された。

また、図 2.7 は集計した施設の選択回数とその位置を示している。円の色で施設の種類を示し、大きさを利用回数で示している。施設の位置は大きく分けて市中央部の水海道駅周辺と、北部の石下駅周辺に集中していて、人口の集中する市街地エリアに概ね一致している。その一方で、利用者数が 2 番目に多い水海道西部病院、3 番目に多い水海道厚生病院に代表されるように、利用者の多い医療施設はそのどちらにも属さない、市街地から離れた位置にあるケースがみられ、目的地の分布は市内に散在している状況となっている。そのため、バスに代表される固定路線の交通手段ではカバーが難しいことが示されている。

## 2.2 運行データを用いた OD 分析

前節の分析によって目的地として選択されている施設が面的に広がっていることがわかる。本節では施設の利用者の出発地を示す Origin-Destination (OD) 分析を行う。図 2.8 は 2017 年のふれあい号利用者の出発地と目的地を 1/2 地域メッシュ (500m メッシュ) 単位で集計し、メッシュ間の年間利用回数を示したものである。併せて施設の目的地選択回数とこれを見ると、OD のパターンを大まかに分類すると、市中央部の水海道地域と市北部の石下地域間の利用、水海道地域内の利用、水海道地域と市南西部の内守谷地域を結ぶ利用が多いことがわかる。また、人口分布と比較すると、人口の集中するメッシュが利用者の出発地となっている場合も存在するが、市北部では人口が少ないメッシュにも関わらず利用が多いケースも見られることから、人口の多寡だけでは必ずしも利用者の多さを説明できないことがわかる。図 2.9 は各 OD を 500m 単位で集計し、その頻度を示したヒストグラムである。ここから、3km 程度の距離を移動する利用者が最も多く、概ね 11km 以下の移動が多くを占めている。

全ての OD のうち、利用者数の多い 4 施設の OD を抽出したものを図 2.10 に示す。きぬ医師会病院、水海道西部病院、カスミ水海道店の OD を見ると、市西部からの OD が多くなっている。この地域は鉄道やバスといった公共交通が存在しない不便地域であり、ふれあい号が地域のモビリティを向上させていることがわかる。また、地域内で完結する近距離の移動よりも、地域間の比較的遠距離の移動が多く、出発地-目的地の空間的配置が分散している。

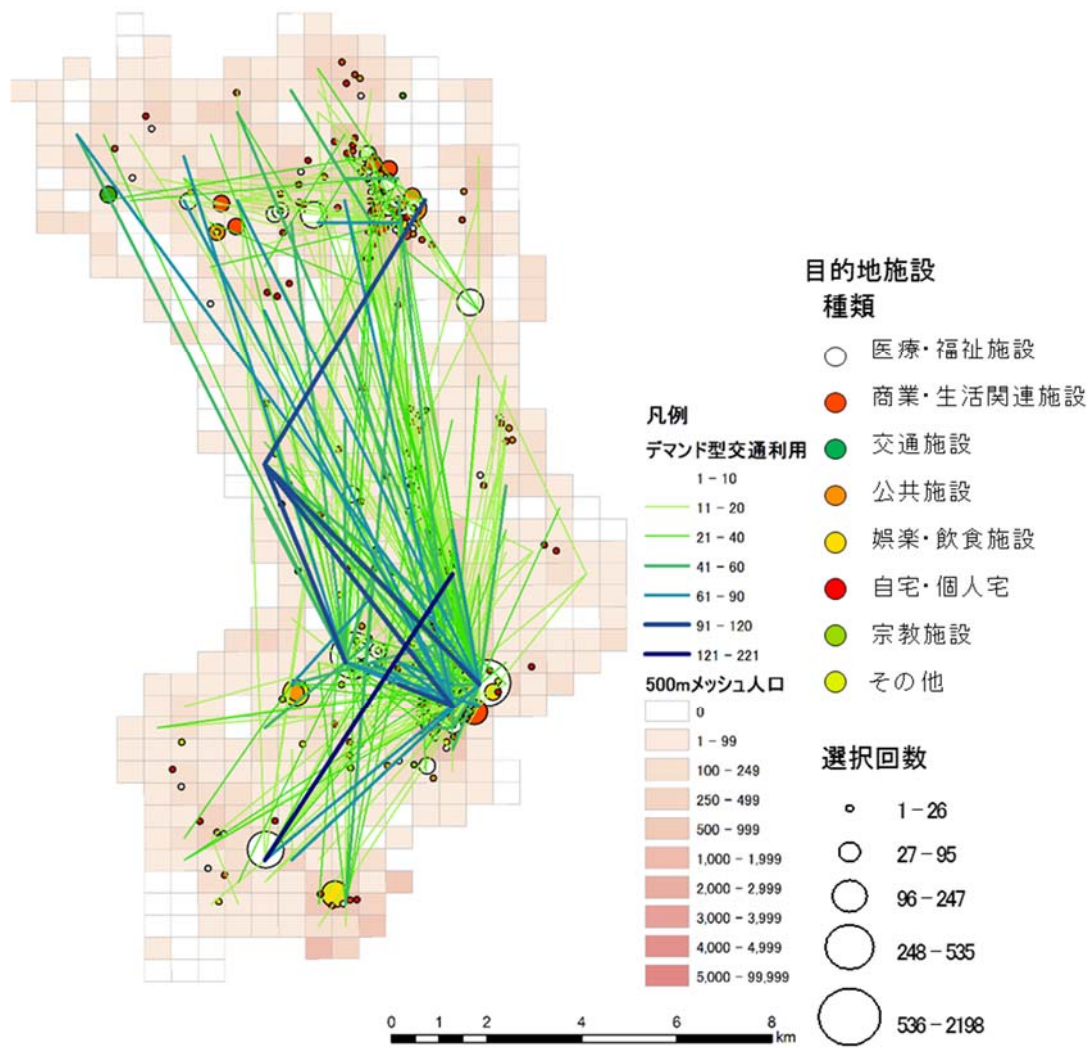


図 2.8 ふれあい号 2017 年利用者 OD

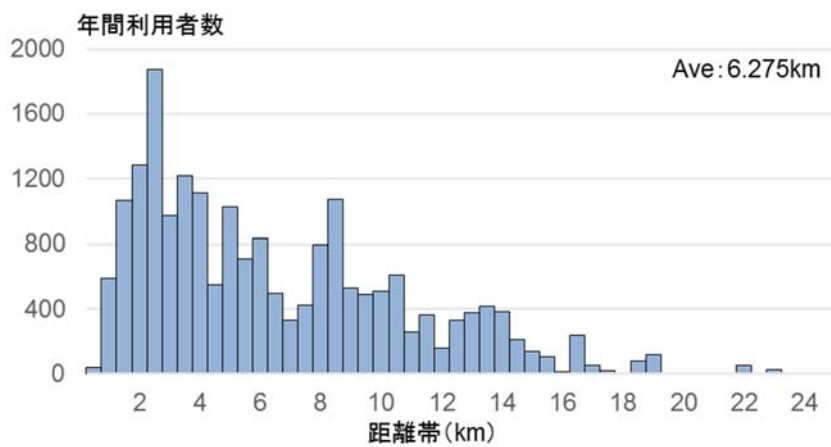


図 2.9 距離帯別 OD データ集計結果

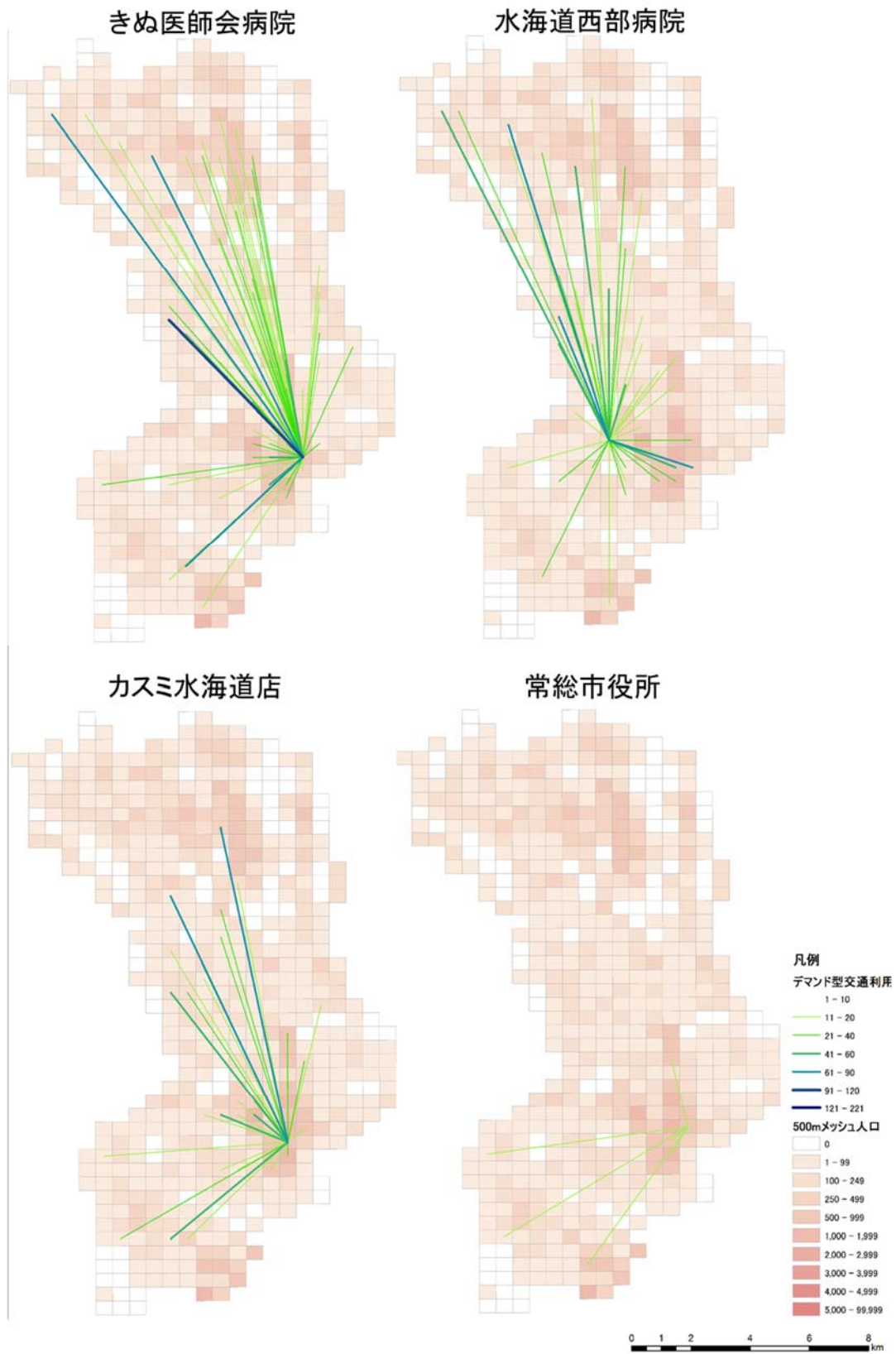


図 2.10 施設別ふれあい号 2017 年利用者 OD

# 第3章 OD フロー捕捉からみたコミュニティバス 路線の適正化とデマンド型交通との併用に関する効果分析

[長谷川, 鈴木 (2018)a]の調査によって, コミュニティバスを運行している市町村が1290 か所あり, うち 415 か所でデマンド型交通が併用されていることが明らかとなった. そうした自治体においてそれぞれの交通手段の提供量のバランスを定量的指標によって議論することは地域公共交通の適正化を行う上で重要である. 本章では複数の都市を対象に, 地域の人口・施設分布に基づく地点の重要度, 地点間の移動需要 (OD: Origin-Destination) フローをもとに最適なバス路線網の構築を行う. さらにバス路線網でカバーされない範囲の需要を運ぶデマンド型交通の車両台数・経路長によって, バスサービスとデマンド交通サービスの提供レベルのバランスを, 利用者を呼損なく輸送する際に必要な運行コストによる経済性によって議論する. また, 地域公共交通に求められる要素が多様化していることから, 経済性のみならず環境性, 健康性指標を用いて多面的に検討する. これにより, 現実の地域公共交通システムの適正化に資する知見を得る.

## 3.1 モデルの構成

図 3.1 に本研究の分析手法について示す.

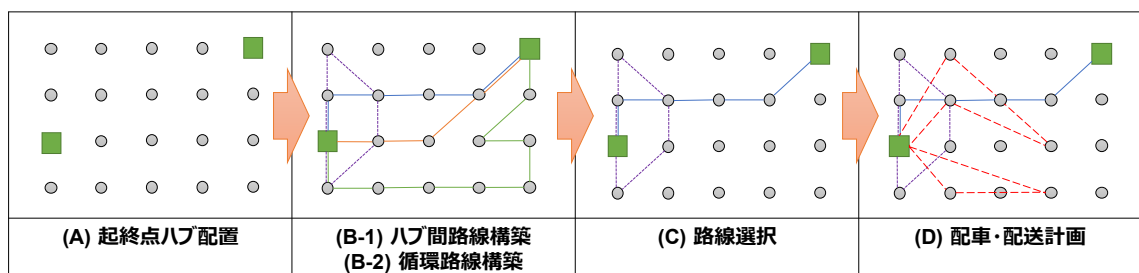


図 3.1 バス路線構築および配車・配送計画

本研究では 4 つの数理計画問題によってバスルートとデマンド型の配車ルートの設計を行う. 利用者は出発地と目的地のノード間がバスで結ばれた時バスを利用し, 結ばれない場合はデマンド型交通を利用するものと仮定し, 第一にバスルートの設計を行うために, (A) 起終点ハブ配置モデルによって, 路線の起終点となる地点を選択する (図 3.1 四角). 次に, (B-1) ハブ間路線構築モデル, (B-2) 循環路線構築モデルによって一定の路線長制約の下でフローを最大化するハブ間路線 (図 3.1 実線) およ

び循環路線（図 3.1 点線）の路線案を構築する。そして、(C) 路線選択モデルによって、一定の路線長制約の下フローを最大化する路線の組合せを求める。なお、一般的に路線を設計する際には起終点となる地点はあらかじめ定まっていることが多いため、モデル(B)，モデル(C)を実行することも可能である。第二に、デマンド型交通の車両台数と走行距離を求めるために(D) 配車配送計画モデルによって、バス路線網が存在しない場合、あるいは選択されたバス路線がある場合の車両巡回経路（図 3.1 破線）がある場合において必要な車両台数を求める。

## 3.2 各モデルの定式化

### 3.2.1 起終点ハブの配置

バス路線のハブは、地域内の実質的な拠点同士を結ぶために、需要点からの最寄りの施設までの総距離が最小化されるように  $p$ -median 問題[Hakimi (1965)]の解の  $P$  箇所に配置することとする。この配置は移動需要を最大化するものではない。これは以下のように定式化される。

#### (A) 起終点ハブ配置モデル

$$\min \sum_{i \in V} W_i \sum_{j \in V} D_{ij} u_{ij} \quad (3.1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in V} u_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \quad (3.2)$$

$$u_{ij} \leq v_j \quad \forall i, j \in V \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in V} v_j = P \quad \forall i \in V \quad (3.4)$$

ただし、

$W_i$	ノード $i$ における重要度
$D_{ij}$	ノード $i$ から候補点 $j$ までの移動距離
$P$	ハブ数
$u_{ij}$	ノード $i$ の利用者が候補点 $j$ を利用するかのバイナリ変数
$v_j$	候補点 $j$ が施設に選ばれるかのバイナリ変数
$V$	ノード集合

である。本分析では[長谷川, 鈴木 (2018)b]にて最もフロー数を獲得したハブ数  $P=7$  を例として用いる。

### 3.2.2 バス路線網の構築

前節で決定されたハブを組み合わせ、起終点ペア( $s \in H$ ,  $t \in H$ )を選択する。  $P=7$  の場合、21通りの組合せとなるハブ( $s \neq t$ )間の路線を構築する。一定の路線長以内となるように、獲得フロー量を最大化するハブ間の路線を以下によって定式化する。

#### (B-1)ハブ間路線構築モデル

$$\max \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} F_{ij} y_{ij} \quad (3.5)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in V} x_{ik} - \sum_{j \in V} x_{kj} = \begin{cases} -1 & k = s \\ 1 & k = t \\ 0 & k \neq s, t \end{cases} \quad \begin{array}{l} \forall k \in V \\ \forall (i, k), (k, j) \in E \\ s \in H, t \in H \end{array} \quad (3.6)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} D_{ij} x_{ij} \leq \lambda D_{st} \quad s \in H, t \in H \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} \geq y_{ik} \quad \begin{array}{l} \forall i, k \in V \\ \forall (i, j) \in E \end{array} \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} \geq y_{kj} \quad \begin{array}{l} \forall k, j \in V \\ \forall (i, j) \in E \end{array} \quad (3.9)$$

$$g_i - g_j + N y_{ij} \geq N - 1 \quad \begin{array}{l} \forall (i, j) \in E \\ i, j \neq s \end{array} \quad (3.10)$$

$$w_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (3.11)$$

ただし、

$F_{ij}$	ノード $ij$ 間のフロー(人/日)
$N$	ノードの数
$\lambda$	迂回率
$x_{ij}$	リンク $(ij)$ が選ばれるかのバイナリ変数
$y_{ik}$	ノード $i$ と $k$ が結ばれるかを示すバイナリ変数
$g_i$	部分巡回路排除制約のためのダミー変数
$E$	リンクの集合
$H$	ハブとなるノードの集合

である。式(3.5)は選択される需要を最大化する目的関数で、ノード  $i$ - $j$  間が路線で結ばれている時にフローが捕捉できるものとする。式(3.6)は路線順序の制約、式(7)は最大路線長制約であり、起終点間の最短距離  $D_{st}$  に対して迂回率  $\lambda$  を乗じた値を最大路線長として設定する。式(3.8), (3.9)はリンク選択とノード選択の関係を示し、ノード  $i, j$  を含む選択される制約、式(3.10), (3.11)は巡回セールスマン問題で用いられる部分巡回回路除去制約[Miller, Tucker, Zemlin (1960)]である。

起終点ペアが同値の場合( $s = t$ )、組合せは7通りとなるが、ハブ周辺を循環する路線を構築するものとし、以下によって定式化する。

### (B-2) 循環路線構築モデル

$$\max \quad \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} F_{ij} y_{ij} \quad (3.5)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{aligned} & (3.8), (3.9), \\ & (3.10), (3.11) \end{aligned}$$

$$\sum_{i \in V} x_{ik} - \sum_{j \in V} x_{kj} = 0 \quad \begin{aligned} & \forall k \in V, \\ & \forall (i, k), (k, j) \in E \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} D_{ij} x_{ij} \leq D_{max}^l \quad (3.13)$$

$$\sum_{i \in V} x_{is} = 1 \quad \begin{aligned} & s \in H \\ & i \neq s \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\sum_{j \in V} x_{sj} = 1 \quad \begin{aligned} & \forall s \in H \\ & j \neq s \end{aligned} \quad (3.15)$$

ただし、

$D_{max}^l$  最大循環路線長 (km)

である。式(3.12)は順序の制約で、ノード  $k$  の流入・流出が同量であることを示す。式(3.13)は最大路線長制約だが、モデル(B-1)の式(7)とは異なり最短経路が定まらないため、一定の値を与える。式(3.14), 式(3.15)は起点となるハブを含むリンクが必ず1本選ばれることを示す。本研究では各路線を独立に構築しているが、すでに路線で結ばれたノード間のフローを0にした状態で路線を構築することで、既存路線を考慮した構築が可能となる。

次に、モデル(B-1), (B-2)によって構築された路線集合  $R$  から、一定の路線長条件の下需要量を最大化する路線の組合せを選択する。ナップザック制約付最大被覆問題(高村・奥村, 2008)の制約式を参考に、以下のように定式化した。



### (C) 路線選択モデル

$$\max \quad \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} F_{ij} z_i z_j \quad (3.16)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{r \in R} D_r c_r \leq D_{max} \quad (3.17)$$

$$\sum_{r \in R} X_{ir} c_r \geq z_i \quad \forall i \in V \quad (3.18)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} z_i z_j \leq |S| - 1 \quad (3.19)$$

ただし,

$D_r$	路線 $r$ の路線長
$D_{max}$	最大総路線長 (km)
$R$	路線集合
$X_{ir}$	ノード $i$ が路線 $r$ に含まれていれば 1, さもなくば 0 をとる値
$ S $	ノード選択集合 $S$ 内のノード数
$z_i$	ノード $i$ が選ばれるかのバイナリ変数
$c_r$	路線 $r$ が選ばれるかのバイナリ変数

である. 式(3.16)の目的関数は路線の構築と同様にフロー量を最大化する. 式(3.17)は総路線長制約, 式(3.18)は路線  $r$  が選ばれた場合にのみ, それが含まれるノードから選ばれるという制約である. 式(3.19)は部分巡回路除去制約である. 当モデルは目的関数がノード  $i$  と  $j$  のバイナリ変数の積によって選択の可否を決定する二次計画問題であるが, 目的関数から乗算を無くした混合整数計画問題と比べて解および計算時間に差が無かったため, このモデルによって分析を行った.

#### 3.2.3 デマンド型交通配車・配送方法の決定

前節で構築された路線網でカバーできない範囲で発生する移動需要がデマンド型交通で移動するものとし, 配車経路問題(久保・村松, 2012)を用い, 車両あたりの最大移動距離の制約の下, 訪問地点を巡回する複数台数の総走行距離を最小化する経路および必要車両台数を求めた.

(D) 配車配送計画モデル

$$\min \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} D_{ij} y_{ij} \quad (3.20)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in C} y_{dj} = 2m \quad (3.21)$$

$$\sum_{j \in C} y_{ij} = 2 \quad \begin{array}{l} \forall i \in C \\ i \neq d \end{array} \quad (3.22)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{j \in A} D_{ij} y_{ij} \leq D_{max}^v \quad (3.23)$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{j \in A} y_{ij} \leq |A| - \frac{1}{2Q} \sum_{i \in A} q_i \quad (3.24)$$

$$y_{dj} \in \{0,1,2\} \quad \forall j \in C \quad d < j \quad (3.25)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i < j \quad i \neq d \quad (3.26)$$

ただし,

$C$  訪問ノード集合

$A$  訪問ノードの部分集合

$Q$  一台あたり最大乗車人数 (人)

$d$  デポを示すノード ( $d \in C$ )

$D_{max}^v$  車両あたり移動距離制約 (km)

$m$  車両台数

$y_{ij}$  ノード  $i, j$  間の車両が移動するかを表す変数 ( $y_{dj}$  はデポからの移動を表す)

$q_i$  ノード  $i$  が部分集合  $A$  に含まれるかを示すダミー変数

である. 式(3.20)は総距離を最小化する目的関数である. 必要最小台数を求めるのであれば車両台数  $m$  の最小化すべきであるが, 解の収束性が悪く距離最小化よりも良好な結果が得られなかったため, このモデルを用いた. 式(3.21)は各車両が出発・帰着するデポ  $d$  に接続する経路数の制約である. デポ  $d$  の位置は都市内で一か所に定めることとし, モデル(A)で  $P$  が 1 の際に選ばれるノードとした. 式(3.22)は訪問ノードにおける接続数制約であり, 式(3.23)は最大経路長制約である. 式(3.24)は車両の容量制約と部分巡回路を禁止する制約であり, 1人あたり乗車・降車の2か所を巡るため,  $Q$  に 2 を乗じている. 式(3.25), 式(3.26)は移動の有無を表す変数  $y$  の制御式である.

次節では実際の都市を対象にこれらのモデルを用いてバス路線網、デマンド型交通の運行効率を評価する。なお、求解には Gurobi 7.0 for python を用い、CPU は Intel Xeon E3-1220 3.0GHz, 16.0GB RAM である。ただし、モデル(B-2), (D)に関しては 24 時間計算を行っても厳密解を得られない場合があったため、上下界ギャップが 1%以下となることを幾つかの例で確認できた 1200 秒を最大計算時間として設定する。

### 3.3 常総市デマンド型交通運行データを用いたバスルート

#### 設計

本節では 2 章で分析を行った常総市デマンド型交通の出発地-目的地データを入力した OD フローデータとして用い、拠点となる施設を起点とした、デマンド型交通利用者を最大限捕捉できるバスルート进行設計する。

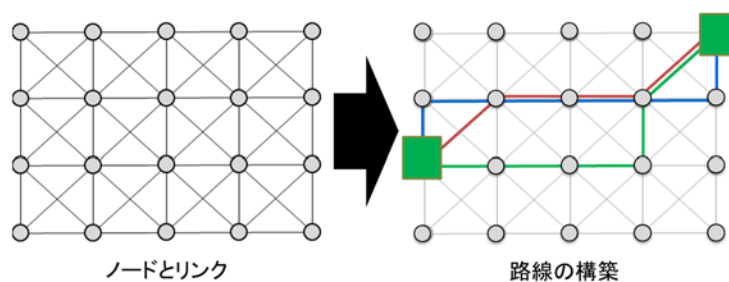


図 3.2 路線構築のイメージ

前述のモデルは図 3.2 に示すように、対象地域内のメッシュ内の代表点のノード、ノード間を結ぶリンク上に構築する。メッシュの重心点をノードとし、各ノードのムーア近傍（上下左右斜めの 8 方向）で隣接するノード間リンクとする。ただし、解の対称性を避けることや、河川や山地など実際の地形を考慮するため、各リンクの長さは GIS を用いて求めた道路距離を用いる。入力データは図 2.8 に示す 2017 年の常総市デマンド型交通の出発地-目的地データを各ノード間で集計した利用回数を 2017 年の運行日数 243 日で除した、一日あたり利用者数としたデータを用いる。

また、路線の起終点となる地点を、水海道地区の中心部にあり、デマンド型交通の利用者数が多いきぬ医師会病院、水海道西部病院、水海道さくら病院、水海道駅、常総市役所のあるメッシュの代表点とし、モデル(B), モデル(C)によって路線を設計する。

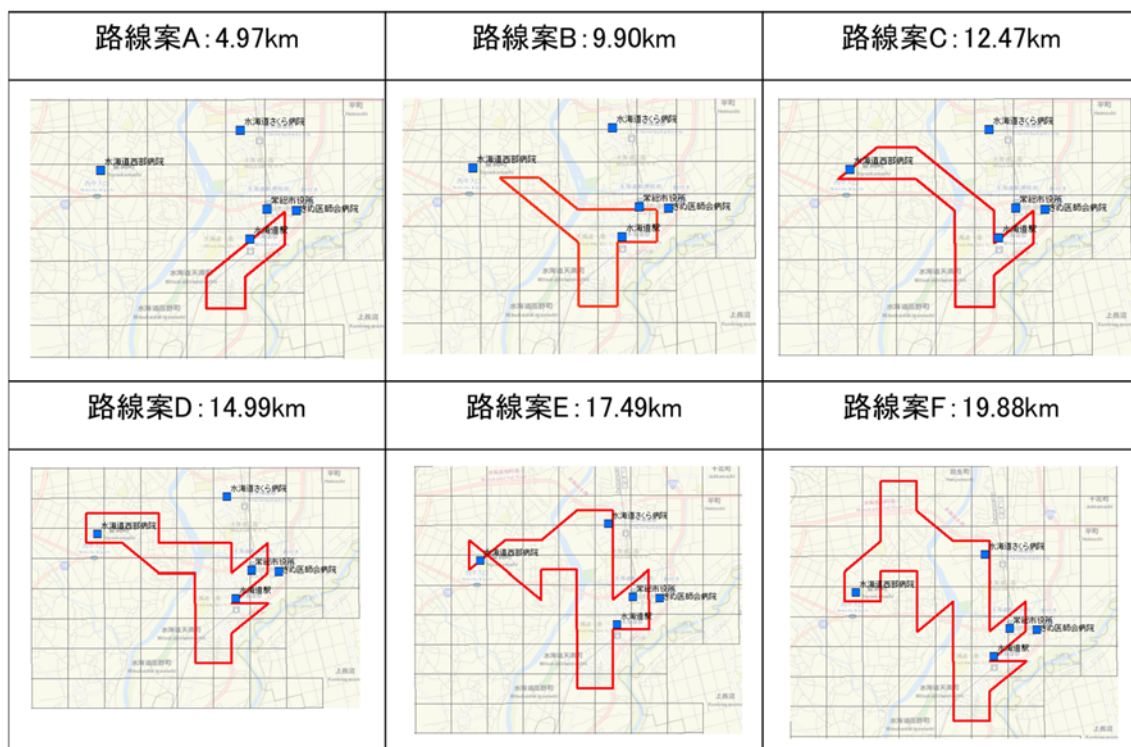


図 3.3 デマンド型交通実績データによる距離帯別路線構築結果

図 3.3 はモデル(C)の最大路線長  $D_{max}$  の値を 5km から、バス車両が 1 時間以内に走行可能である 20km まで変化させ、構築された路線のパターンである。最も路線長の短い路線案 A は、市の中心部である水海道駅、きぬ医師会病院を起点とし、人口が比較的多くきぬ医師会病院への利用者が多い水海道駅南部を經由する路線が第一に構築される。路線案 B ではその路線が西側の豊岡地区に延長され、路線案 C で利用者の多い水海道西部病院を經由する路線が構築される。その後、全体的に路線が外側に広がっていき、路線案 F では豊岡地区の北部までカバーした路線となる。

各路線案の効果を路線が經由するメッシュの人口、メッシュ内の病院の数、そして捕捉 OD フロー量で比較を行ったのが図 3.4、図 3.5、図 3.6 である。なお、人口は平成 22 年度国勢調査・1/2 地域メッシュ統計、医療施設の分布は国土数値情報平成 26 年医療施設データを用い、一般診療所や歯科医院なども対象としている。また、図 3.3 左が捕捉した人数、病院数、フロー数であり、図右が路線長で除した 1km あたりの値である。路線長が長くなるにつれて人口、病院数、捕捉 OD フローが増加しているものの、路線 1km あたりで見ると、人口および病院数は特に人口と施設が集中する市街地のみを經由する路線案 A の時の値が最も高い。しかし前節での分析結果でも示した通り、デマンド型交通の利用者は 3km 以上の利用者が多く、短い路線では利用できない。路線 1km あたりの捕捉 OD フローで見ると、水海道地域の南部と水海道西部病院をカバーする路線案 D が最も効率的となる。

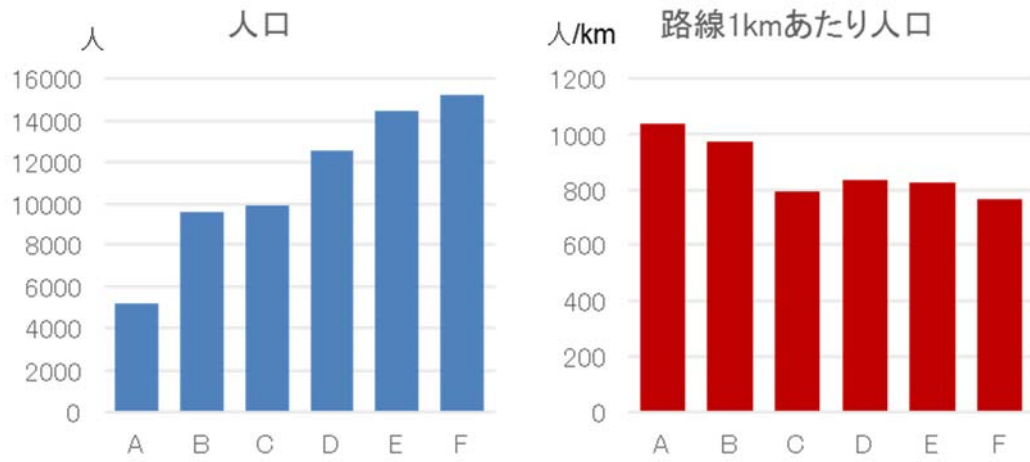


図 3.4 各路線案がカバーする人口

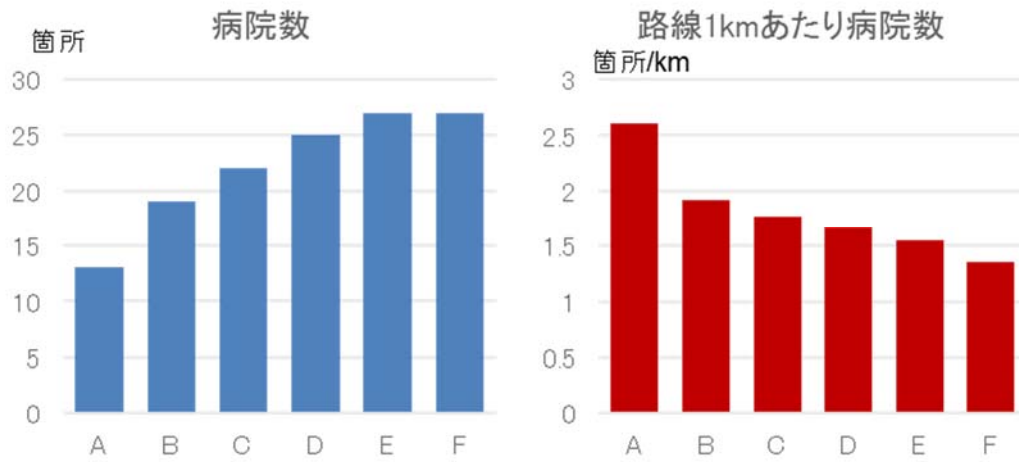


図 3.5 各路線案がカバーする病院数

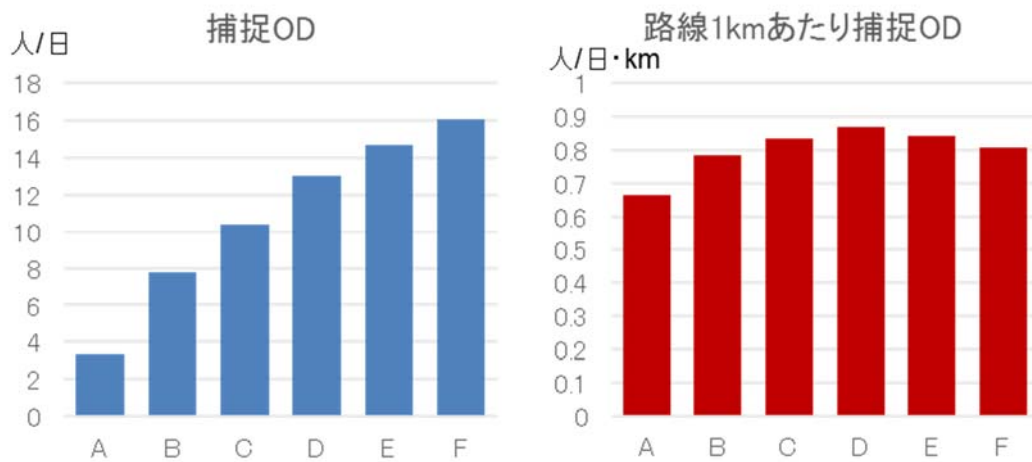


図 3.6 各路線案がカバーする OD フロー

### 3.4 人口・施設分布を用いた路線網の構築とデマンド型交通とのベストミックス分析

本節では、公共交通に対する潜在的需要を考慮するため、人口分布および商業施設、医療施設分布を用いて OD フローを推計する。

#### 3.4.1 OD フローデータの推計方法

モデル(A)で用いるノードの重要度、およびモデル(B), (C), (D)で用いるノード間の OD フローは、人口が多く、診療科数が多い医療施設、店舗面積が広い商業施設が集積しているほど重要度が高く、ノードの発生量・集中量が多いという考え方の下、人口、および施設側指標である医療施設の診療科数、商業施設の店舗面積を各メッシュ単位で集計する。なお、人口分布は平成 22 年国勢調査 2 分の 1 地域メッシュ(500m メッシュ)統計・総人口データ、医療施設の分布は国土数値情報平成 26 年医療施設データ、商業施設は東洋経済新報社平成 24 年大型小売店データを用いる。

また、人口・施設密度の多寡を都市内で相対的に評価するために、ノード別に集計した人口、医療施設の診療科数、商業施設の店舗面積数を対象都市内における最大値、最小値の値を用いて標準化し、都市内での相対的な重要性を評価する。

ノード  $i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) の指標  $c$  ( $c=\{\text{人口}:\text{pop}, \text{医療施設}:\text{med}, \text{商業施設}:\text{com}\}$ ) における重要度  $w_i^c$ 、およびノード  $i$  の重要度  $W_i$  は以下の式より与える。

$$w_i^c = \frac{A_i^c - A_{\min}^c}{A_{\max}^c - A_{\min}^c} \quad (3.27)$$

$$W_i = w_i^{\text{pop}} + \alpha w_i^{\text{med}} + \beta w_i^{\text{com}} \quad (3.28)$$

なお、 $w_i^c$  の値域は  $[0, 1]$  である。ただし、

$A_i^c$	ノード $i$ の指標 $c$ の値
$w_i^c$	ノード $i$ の指標 $c$ の正規化された値
$A_{\max}^c$	指標 $c$ の都市内における最大値
$A_{\min}^c$	指標 $c$ の都市内における最小値
$W_i$	ノード $i$ における重要度
$w_i^{\text{pop}}$	ノード $i$ の人口を正規化した値
$w_i^{\text{med}}$	ノード $i$ の診療科数を正規化した値
$w_i^{\text{com}}$	ノード $i$ の店舗面積を正規化した値
$\alpha, \beta$	施設側指標に対する係数

である。式(3.27)によってノード別、指標別の重要度を評価する。そして、式(3.28)に示すようにそれらの和によってノードの重要性を評価する。ただし、施設側指標に関してはそれぞれの利用頻度の差を係数 $\alpha, \beta$ によって考慮する。 $\alpha, \beta$ は平成27年度全国都市交通特性調査の目的別集計結果における、私事目的移動のうちの買物および通院が占める割合を用い、それぞれ0.3262, 0.1961とする。すなわち、医療施設利用の1.6倍、商業施設に対する需要が考慮される。

ノード $ij$ のODフロー $F_{ij}$ に関しては、メッシュ人口に1時間当たりトリップ原単位、施設別選択確率を乗じた値を用いる。

$$F_{ij} = A_i^{pop} \cdot \mu_{ij} \cdot \left( \frac{\alpha w_j^{med}}{\sum_j w_j^{med}} + \frac{\beta w_j^{com}}{\sum_j w_j^{com}} \right) \quad (3.29)$$

ただし、

- $F_{ij}$  ノード $ij$ 間のフロー(トリップ/人・日)
- $A_i^{pop}$  ノード $i$ の人口(人)
- $\mu_{ij}$   $i-j$ 間の距離帯におけるトリップ発生原単位  
(トリップ/人・日)

である。距離帯別トリップ発生原単位 $u_{ij}$ は、図3.7に示す平成27年度全国都市交通特性調査におけるバス利用者の移動距離帯別トリップ発生原単位を用い、最も近い距離帯を選択する。これにより、例えば100mや200mといった近距離の移動においては、徒歩で移動する人が多いことなど、実際の交通手段選択による利用者量の変化が考慮される。

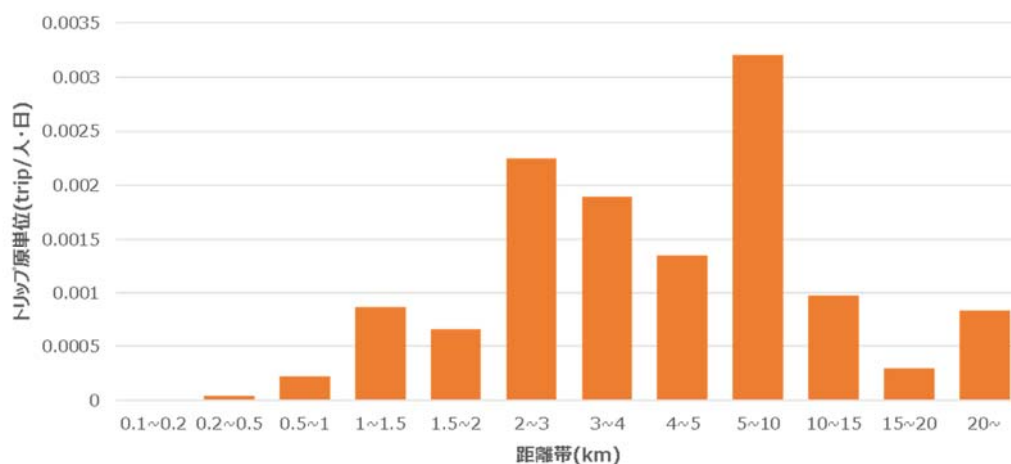


図 3.7 距離帯別トリップ原単位  
(H27 全国 PT 調査 私事目的・バス利用)

デマンドの訪問集合  $C$  は、デポとなるノードと、 $i-j$  間の平均 OD フロー量  $F_{ij}$  を一日の運行便数  $Int$  で除した値  $f_{ij}$  を平均、分散を 1 としたポアソン分布  $P(k)_{ij}$  に従う乱数を発生させ、 $i-j$  間利用者数  $k$  を決定し、 $k$  の数だけ  $i-j$  を訪問集合  $C$  に含める。ただし、 $i-j$  間がバス路線で結ばれている場合は  $k=0$  として需要は発生しないものとする。乱数を 100 パターン発生させ、その平均値によって結果を比較する。

表 3.1 にモデルで用いるパラメータを整理する。

表 3.1 パラメーター一覧

変数	概要	数値
$P$	ハブ数 (箇所)	7
$\lambda$	迂回率	1.1, 1.2, ..., 2.0
$D_{max}^l$	最大循環路線長 (km)	5, 7.5, 10, ..., 20
$D_{max}$	最大路線長 (km)	5, 10, 15, ..., 80
$Q$	一台あたり最大乗車人数 (人)	3
$D_{max}^v$	車両あたり移動距離制約 (km)	30
$\alpha$	医療施設選択係数	0.3262
$\beta$	商業施設選択係数	0.1961
$Int$	一日の運行便数	10

### 3.4.2 常総市における OD フローデータ

茨城県常総市の人口・医療施設・商業施設分布、ノード・リンク数を図 3.8 に示す。常総市は都心部に比べ人口密度は低く、その分布は北部（石下地区）と南部（水海道地区）に大きく分かれ、施設の分布も北部、南部に分かれて分布していることがわかる。図 3.9 にノード重要度、OD フローの構築結果を示す。常総市南側の水海道駅周辺には人口、施設が集中しているためにノード重要度が高くなる。そして、重要度が高い地域を目指し市内において相対的に都市の中心部地点にフローが集中している様子が見られる。また、OD フローを 500m 間隔で集計した結果、およびフロー量を重みとした加重平均の値を図 3.10 に示す常総市は 17km 程度の距離帯まで凡そ均等なフロー量分布となっていて、平均距離も 9.6km となっている。このような人口・施設分布の違いによる移動需要の量的・空間的分布を考慮した上で、前述のモデルを用いてバス路線網の構築、デマンド型交通の必要車両台数を分析する。



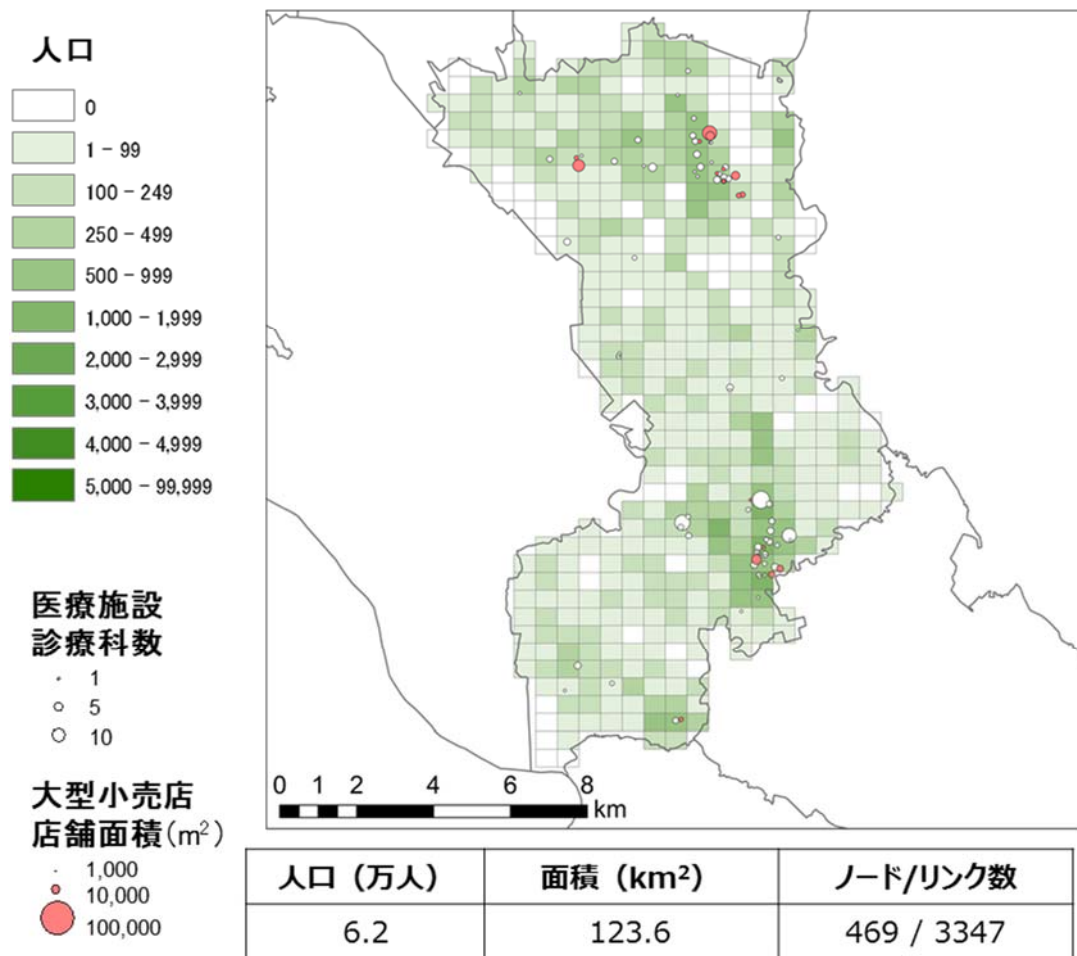


図 3.8 常総市の概要・ノード・リンク数

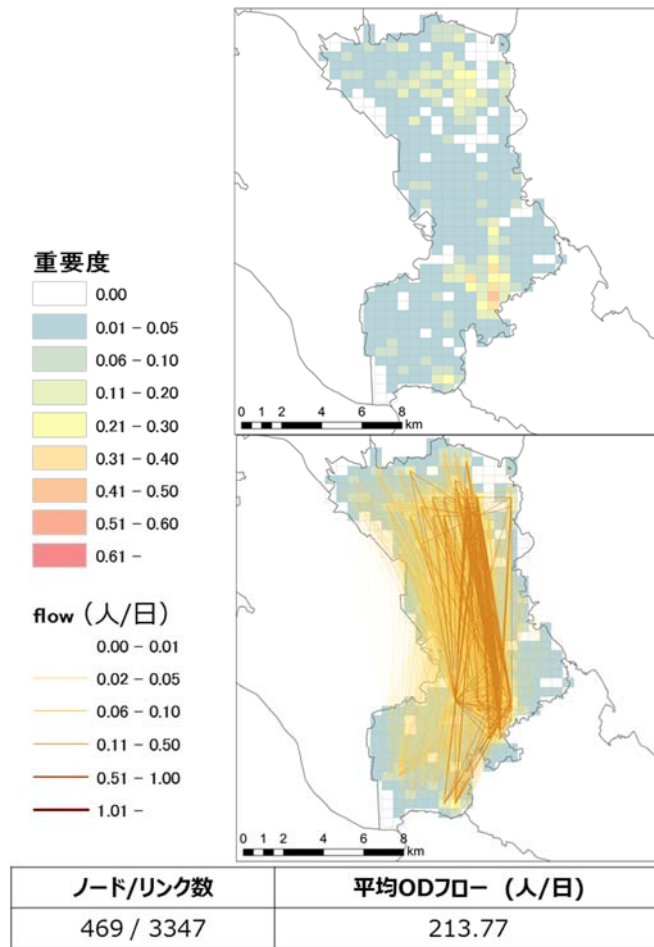


図 3.9 ノード重要度, 平均 OD フロー

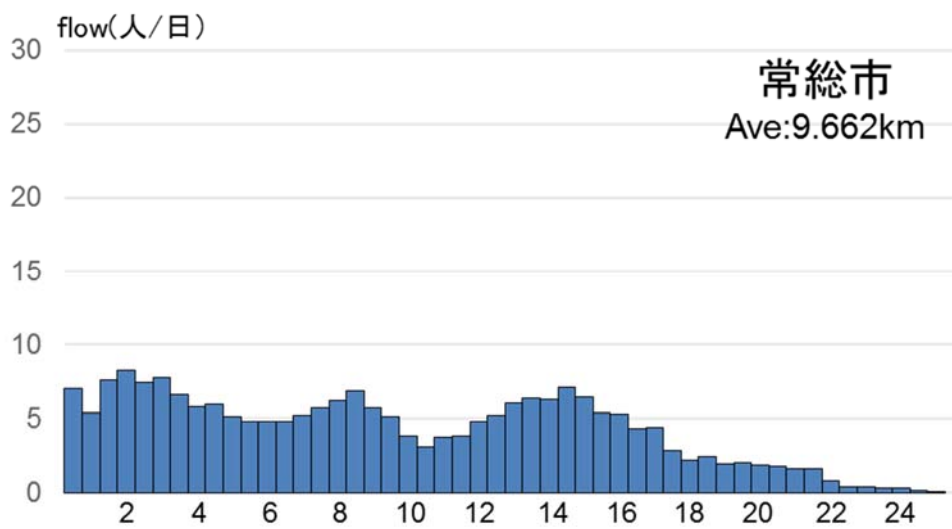


図 3.10 距離帯別 OD フロー集計結果 (500m 間隔)

### 3.4.3 路線網構築結果

モデル(A)で配置したハブの結果について図 3.11 に示す。7か所のハブが都市内に分散して配置されているが、重要度の高いノードの分布が市の端部に片寄っていて、ハブの配置もそちらに寄っていることがわかる。

次に、モデル(B-1)で構築したハブ間、およびモデル(B-2)で構築した循環路線の結果について、その例を図 3.12 に示す。ハブ間路線については、最短経路と比較し、路線長を1km弱増加させることによって、重要度の高いノードを経由し、捕捉フローが0.563から4.162へと増加していることが分かり、少しの迂回によって乗客を大きく増加させることができる可能性を示している。しかし、路線長をさらに延長しても捕捉フローの増加は頭打ちとなるため、適切な路線長が選択される必要がある点が示された。その傾向は循環路線も同様であるが、人口や施設の分布は基本的に、集中地域から離れるにしたがって密度が減少していき、面的に広がっている。現実の地域公共交通は交通不全地域の改善という意味合いから、中心部と郊外部を結ぶ拠点間路線が重視されることが多いが、人口・施設が集中している中心部においては、例えば東京・丸の内地区を巡回するシャトルバスのような、短距離の循環路線によるフロー捕捉が効率的であることから、中心部を網羅的に結ぶ必要があるという結果が示された。

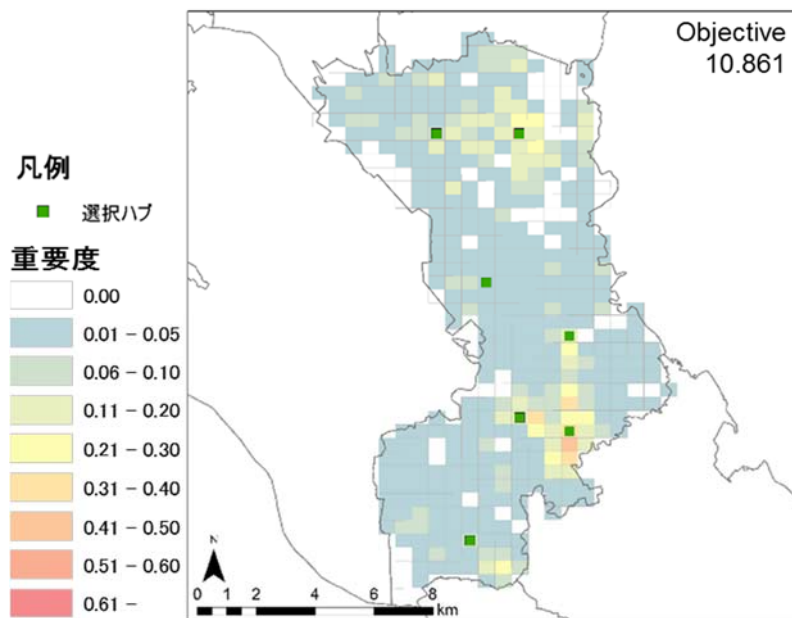
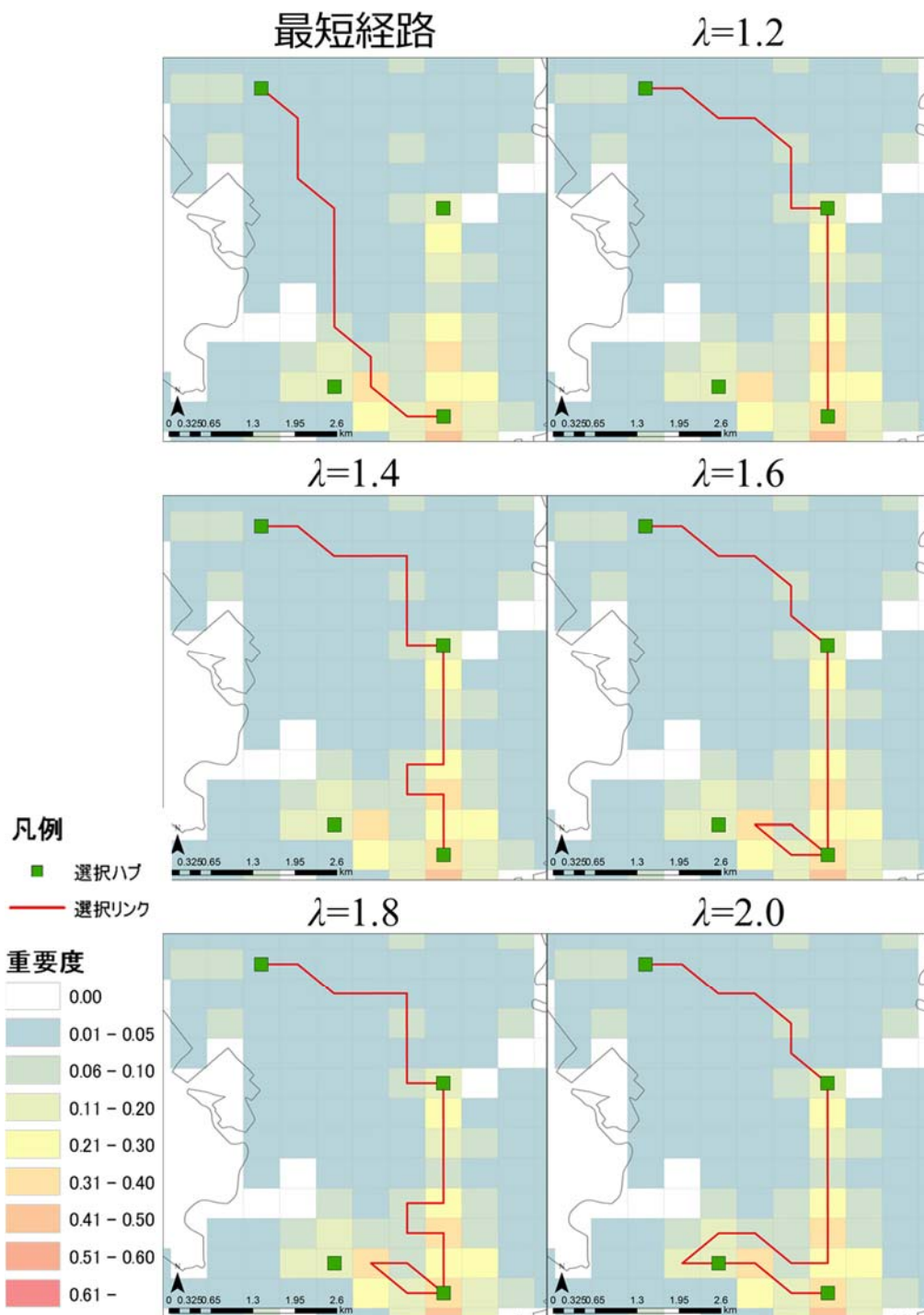
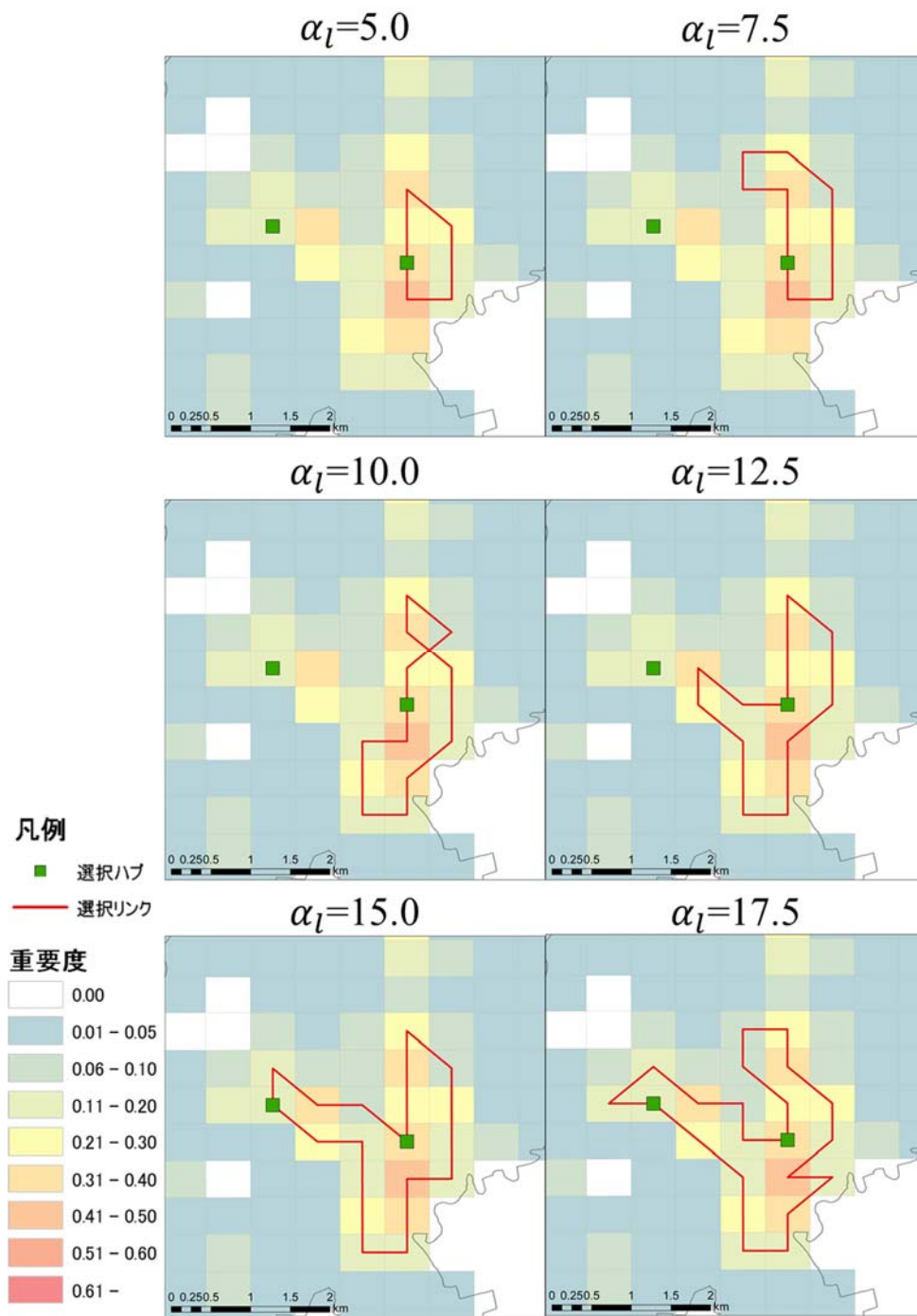


図 3.11 ハブ配置結果 (P=7)



迂回率・ $\lambda$	1.0 (最短経路)	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
路線長(km)	8.32	9.97	10.80	13.16	14.96	16.60
捕捉ODフロー (人/日)	0.563	4.162	4.733	5.210	6.051	9.185

図 3.12 ハブ間路線構築例 (常総市主要部)



路線長・ $\alpha_l$	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5
路線長(km)	4.98	7.50	10.00	12.16	14.97	17.16
捕捉ODフロー (人/日)	4.225	7.307	11.960	13.636	17.236	21.688

図 3.13 循環路線構築例 (常総市主要部)

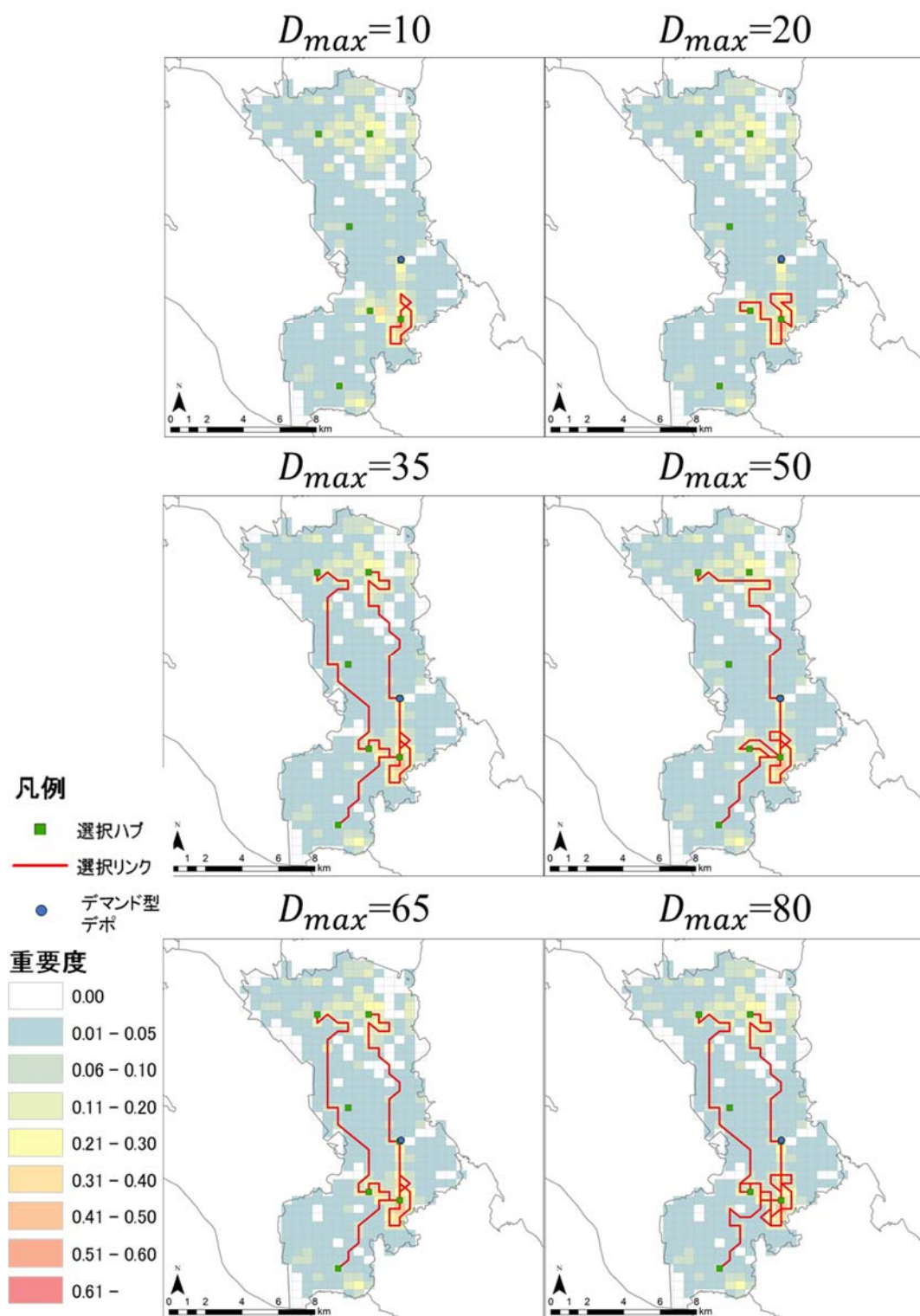


図 3.14 路線長別選択パターン・常総市



図 3.15 バス路線長別フロー捕捉数・捕捉率

構築した路線案の中から、モデル(C)を用いて路線長制約の下、最も多くのフローを獲得できる路線の組合せ選択し、路線網を構築した結果を図 3.14 に示す。これを見ると、市内でノードの重要度が高く、フローが集中する部分の循環路線から選択され、路線長が長くなるにつれ、循環路線が経由しているハブに接続するハブ間路線が選ばれていることがわかる。南部の循環路線から形成され、その地点を網羅する路線と、北部と南部を縦断する路線が選択される。

路線長別の 1km 当たりフロー捕捉数および市内全体に占めるフロー捕捉率を図 3.15 に示す。路線長が長くなるにつれてフローの捕捉率が上昇するが、捕捉率 33.4% までしか上昇しないという結果となり、また、1km 当たり OD フロー捕捉数からみた路線の効率性に関しては、重要度の高いノードが南北離れて分布し、途中に高いノードが少ない常総市では最大効率の 35km で 41 人程度の利用に留まった。これより、OD データの構築において、都市の人口・施設密度や市街地形状といった空間的特徴によってその量・分布が異なる点を示したが、人口密度が同程度であってもフローの空間的な集中の多寡によって、バス路線の効率性も左右されることを示した。

### 3.4.4 デマンド型交通の運行効率評価

デマンド型交通の利用者がバス路線の拡充によって減少するという想定の下、図 3.16 に、図 3.14 に示すバス路線を導入し、バスを利用することができないノード間のフローをデマンド型交通で捕捉した際の、デマンド型交通の利用者数とモデル(D)で導出された車両台数を示す。なお、その際のデポの位置は図 3.14 内丸印で示す。ノード間の平均 OD フロー量  $F_{ij}$  を一日の運行便数  $Int$  で除した値  $f_{ij}$  を平均、分散を

1 としてポアソン分布 $P(k)_{ij}$ に従う乱数によって利用者数を決定している。バス路線によるフロー捕捉数が少ない常総市に関しては 23 人から 13 人程度に減少が留まる。

ただし、利用者数の減少に伴って輸送に必要台数も減少するために、その減少量によってバスとデマンド型交通の併用効果が生じる可能性がある。バス路線がないときの必要車両台数は平均約 9 台となっていて、. そしてバス路線の導入によって必要となる車両台数が減少していくが、最大で 3 台の車両の削減の可能性を見込めることが明らかとなった。

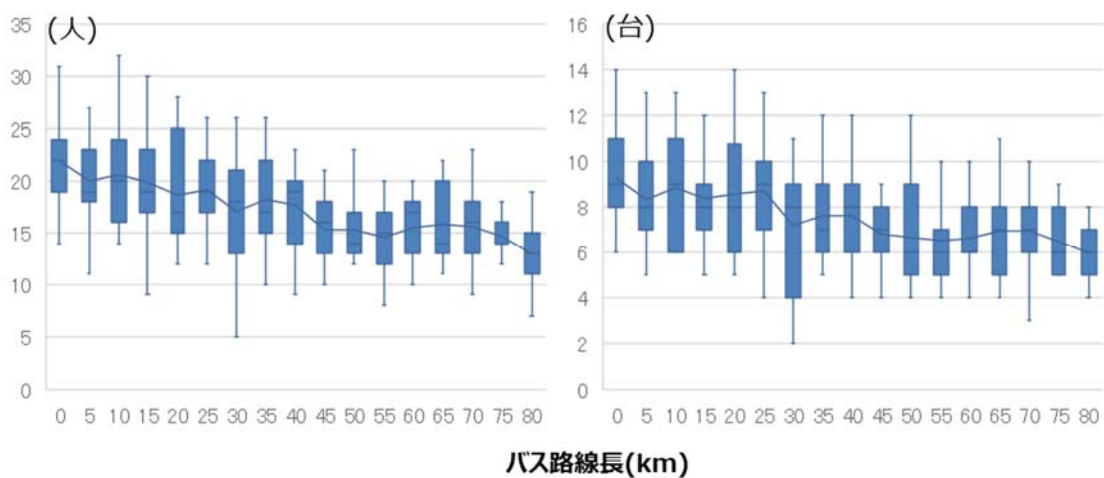


図 3.16 バス路線長別のデマンド型交通の平均車両台数・利用者数

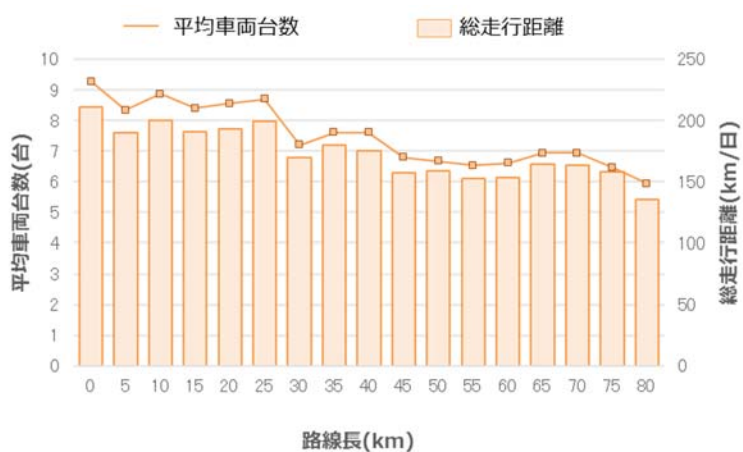


図 3.17 バス路線長別のデマンド型交通の平均車両台数・総走行距離



### 3.4.5 経済性指標からみたバス・デマンド型交通の提供バランス

バス路線の路線長を増やし、提供レベルを上げることでデマンド型交通の提供レベルを下げる事が可能と前節で示された。ただし、バスサービスの拡張が進むと需要が低密な部分においても路線が構築されることとなり、[長谷川, 鈴木 (2017)]で示した分析結果より、デマンド型交通でのカバーの方が効率的となる。本節ではバスサービスとデマンド型交通の最適な提供量バランスについて、運行経費からみた経済性によって評価する。

運行経費については、バスサービスは路線長に応じて費用を計上する。平成 25 年度自動車運送事業経営指標より乗合バス 1km 当たり運送費 321.1 円に一日の運行便数  $Int$  と路線長を乗じた値を日当たりのバス運行経費とする。デマンド型交通は車両 1 台あたりで費用を計上する。図 3.16 で示したデマンド型交通の車両台数の各バス路線長別の平均値を用い、[国土交通省 (2016)]より、1 時間・1 台当たり地域標準経常費用 2,721.96 円に、バスと同様に  $Int$  を乗じた値を日当たりのデマンド型交通運行経費とする。よって、バス路線 8.5km でデマンド型交通の車両が 1 台減少できるようであれば併用効果が生まれることになる。

図 3.18 はバスの路線長別のバスおよびデマンド型交通の運行経費である。バス路線長が増加することによってバス運行にかかる費用が増加する一方、デマンド型交通は利用者が減少することで必要となる車両台数が減少するために運行費用が減少する。よって、バス路線長が 0km における費用はすべての需要をデマンド型交通で運行した場合となり、この値よりも両交通手段費用の合計である総費用が小さい値となればバス路線による併用効果があるということになる。図 3.18 をみると、路線 5km の際の総費用がデマンド型交通のみの際の費用よりも低くなっており、バス路線による総費用の削減が実現出来ていることがわかる。

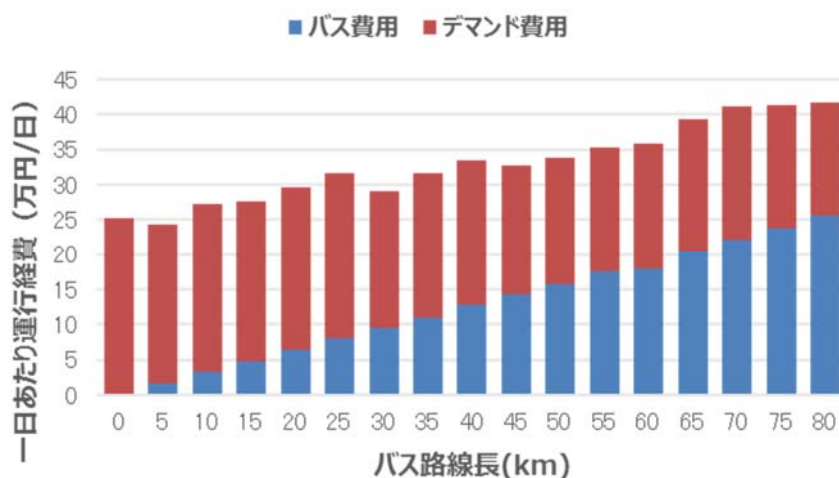


図 3.18 バス路線長別バス・デマンド型交通運行経費

ただし、その額は一日当たり 9400 円、年間に換算して約 340 万円と小さい結果となった。本検証にはデマンド型交通の運行に必要な、車両以外のシステム費用、オペレーター人件費などは計上されていないため、それらを考慮すれば逆にマイナスとなってしまう可能性がある。その点を鑑みると、常総市ではデマンド型交通のみのシステムが適していると言える。

なお、都市構造の違いに言及し、複数の都市において多面的にバス・デマンド型交通のベストミックス分析を行った結果については[長谷川, 鈴木 (2019)]を参照されたい。

## 第4章 おわりに

### 4.1 本研究のまとめ

本研究では常総市における公共交通であるデマンド型交通を対象に、(1) GIS を用いた地域公共交通利用状況の把握、(2) デマンド型交通利用データを用いたバス路線網構築、(3) 人口・施設データによる需要の推計とバス・デマンド型交通のベストミックス分析を行い、公共交通体系の方向性を探るための基礎的知見を得た。

#### (4) GIS を用いた地域公共交通利用状況の把握

常総市の公共交通に係る地理情報データベースおよび統計情報を整備し、デマンド型交通「ふれあい号」の利用実態を把握した。ふれあい号の1トリップは平均6km程度となっていて最も頻度の多い距離は約3kmとなっているが、水海道地区と石下地区間の利用が多く、固定路線によるカバーはある程度の路線長が必要であることが明らかとなった。

#### (5) デマンド型交通利用データを用いたバス路線網構築

デマンド型交通の運行実績データを用い、市中心部の水海道地区を対象に利用者により多くカバーできるバス路線の構築を数理計画問題によって求め、水海道地区の中央部から南部、西部、北部の順番で優先されて路線が設定されることを明らかにした。また、路線長1kmで捕捉するODフロー量の観点から、最も効率的な路線のパターンとその効果について定量的に示した。

#### (6) 人口・施設データによる需要の推計とバス・デマンド型交通のベストミックス分析

500mメッシュ別の人口データ、病院、大型小売店データを用いてODフローデータを推計し、それを元にバス路線の起終点の決定、路線網の構築、バスがカバーされない範囲を運行するデマンド型交通の走行距離と車両台数を分析した。路線の効率性に関しては、重要度の高い地点が南北離れて分布し、途中に空白地帯がある常総市では最大効率の35kmで日当たり41人程度の利用に留まった。そのため、デマンド型交通との提供バランスを運行コストの面で検討した場合、併用の効果は僅かであり、デマンド型交通の運行に必要な諸経費を考慮するとデマンド型交通単独の交通体系が望ましいことを示した。

これらの分析によって、常総市にふさわしい公共交通の方向性を明らかにし、地域のモビリティ向上につながる公共交通体系の構築に寄与することができる。

## 4.2 今後の課題

今後の課題としては以下のような点が残されている。

第一に、より望ましい運行体系の追及があげられる。デマンド型交通の運行実績の分析から南北の地区間の移動量が多いことを明らかにしたが、南北方向の公共交通軸として関東鉄道常総線が存在する。鉄道との連携によってデマンド型交通の運行効率の向上を図り、総合的な交通体系の充実が図れるかを検討することが課題となる。

第二に、高齢化の進行によって変化すると考えられる将来需要への対応策の検討があげられる。高齢化の進行に伴い、運転免許返納者の増加や医療施設などへの交通需要の増加によって、公共交通体系をどう見直すかの検討が必要と考えられる。加えて、運行事業者にも少子高齢化の影響があり、ドライバーの数が減少し、柔軟な運行が困難となることが予想される。このため、ライドシェアや自動運転バスなど、新しい技術についても考慮する必要がある。

## 参考文献

- [Hakimi (1965)]: Hakimi, S. L. (1965). Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Network and Some Related Graph Theoretic Problems. *Operations Research*, **13**(3), 462–475.
- [MaaS\_Global (2018)]: MaaS\_Global. (2018). MaaS as a Concept. <<https://maas.global/maas-as-a-concept/>>, (accessed: 12/30/2018)
- [Miller, Tucker, Zemlin (1960)]: Miller, C. E., Tucker, A. W., and Zemlin, R. A. (1960). Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. *Journal of the ACM*, **7**(4), 326–329.
- [元田, 高嶋, et al. (2005)]: 元田良孝, 高嶋裕一, 宇佐美誠史, and 金田一真矢. (2005). DRT(デマンドバス)に関する幾つかの考察. *土木計画学研究・講演集 (CD-ROM)*, **31**, 258.
- [原 (2005)]: 原文宏. (2005). 公共交通としてのDRTの将来展望. *土木計画学研究 講演集, 2005*, **31**.
- [国土交通省 (2016)]: 国土交通省. (2016). 地域公共交通網形成計画及び地域公共交通再編実施計画作成のための手引き (別添資料).
- [国土交通省自動車交通局旅客課 (2009)]: 国土交通省自動車交通局旅客課. (2009). 地域公共交通づくりハンドブック.
- [新谷, 原田 (2017)]: 新谷洋二, and 原田昇. (2017). 都市交通計画. 技報堂出版.
- [秋山, 吉田, et al. (2009)]: 秋山哲男, 吉田樹, 猪井博登, and 竹内龍介. (2009). 生活支援の地域公共交通. 学芸出版社.
- [長谷川, 鈴木 (2017)]: 長谷川大輔, and 鈴木勉. (2017). 需要密度・移動距離に着目した多様な公共交通システムの優位性に関する理論的考察. *都市計画論文集*, **52**(3), 1284–1289.
- [長谷川, 鈴木 (2018a)]: 長谷川大輔, and 鈴木勉. (2018a). デマンド型交通の導入状況の推移とその空間的・統計的特徴. In 東京大学空間情報科学研究センター全国共同利用研究発表大会 (p. B13).
- [長谷川, 鈴木 (2018b)]: 長谷川大輔, and 鈴木勉. (2018b). 地域内ODフローを考慮した地域公共交通システムにおけるバス路線網構築. In 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集 (pp. 98–99).
- [長谷川, 鈴木 (2019)]: 長谷川大輔, and 鈴木勉. (2019). 路線網形状を考慮したバス・デマンド型交通併用効果の分析. *GIS: 理論と応用*, **27**(1).
- [高村, 奥村 (2008)]: 高村大也, and 奥村学. (2008). 最大被覆問題とその変種による文書要約モデル. *人工知能学会論文誌*, **23**(6), 505–513.

---

常総市予約型乗合交通の最適化に関する研究

国立大学法人筑波大学・常総市 共同研究  
研究成果報告書

平成 31 年 3 月 31 日発行

編集・発行  
筑波大学 システム情報系  
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

---