

中山間地における 自動運転に対応した道路空間整備延長の分析 ～整備優先順位設定手法の検討～

西堀 泰英¹・巖 先鏞²

¹ 正会員 公益財団法人豊田都市交通研究所（〒471-0024 愛知県豊田市元城町 3-17）

E-mail: nishihori@ttri.or.jp

² 非会員 東京大学空間情報科学研究センター（〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5）

E-mail: eomsunyong@csis.u-tokyo.ac.jp

自動運転は、公共交通が不便な中山間地での移動手段確保方策等として期待されている。中山間地では人口密度が低いいため、自動運転に対応した道路空間（自動運転対応道路）の効率的な整備が求められる。本稿では、自動運転対応道路の整備優先順位の設定手法を提案し、愛知県豊田市の中山間地に位置する旭地区を対象に、実際の人口分布と道路網を用いて、複数の道路網パターンと優先度指標の分析を行った。その結果、全住民が自動運転を利用可能とするための必要整備延長は最大156km（全道路の約半分）だった。拠点や優先順位の設定方法により同じ人口をカバーするための要整備延長が異なり、整備量の制約を考慮した拠点と指標設定が必要であることを示した。提案した手法により、自動運転の実現に向けた効率的な整備区間の提案に寄与できると期待できる。

Key Words : *Autonomous Vehicles, Mountainous area, Route planning method*

1. はじめに

官民ITS構想・ロードマップ2019¹⁾では、自動運転システムによる社会的期待として、交通事故の削減、交通渋滞の緩和、環境負荷の低減、運転の快適性向上、高齢者等の移動支援など、移動に関わる様々な問題への貢献があげられている。国土交通省は、2017年以降「中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス実証実験」に取り組んでおり、移動支援のみならず物流の効率化などの検討が行われている。

中山間地は、人口密度が低いことに加えて自動車利用が進展しているため、公共交通サービス水準が低い地域が多い。社会全体で人手不足が深刻化する状況であり、バスなどの公共交通機関の運転手不足は深刻な問題である。今後収益の厳しいバス路線から撤退するケースが増えかねない。こうした背景から、自動運転技術による移動手段確保への対応は、中山間地においてより切実であるといえる。

自動運転車が道路を走行するためには、高精度3次元地図や磁気マーカーなどの自動運転車に対応した道路空間（以下、自動運転対応道路）の整備が必要となる^{補注1)}。

先述のように中山間地は人口密度が低いことから、すべての道路を自動運転対応道路として整備するのは現実的ではない。中山間地への自動運転の導入に向けては、住民が自動運転車を利用するために必要となる自動運転対応道路を把握することが重要であると考えられる。

自動運転車の導入効果を検討した文献は、Shared Autonomous Vehicles (SAVs)の導入効果や、SAVsの配車方法について評価したものが多数存在するが^{例えは2)}。しかし、それらの多くは、都市部や郊外部を対象として自動運転車はあらゆる道路を走行できることを想定した検討であり、中山間地での自動運転対応道路の整備について検討した事例はみられない。

本稿では、中山間地における自動運転車の導入に向けた自動運転対応道路の整備優先順位の設定手法を提案し、中山間地に位置する愛知県豊田市の旭地区でのケーススタディから道路網の形状と用いる評価指標の違いによる整備量と優先順位の差を分析することを目的とする。

2. 方法

(1) 使用するデータ

本研究の対象地区は、愛知県豊田市の北東部矢作川上流域の中山間地に位置する旭地区（図-1）である。2005年に現豊田市に合併した旧旭町の区域である。人口約2,600人（2020年1月、豊田市全体の0.6%）、面積約82km²（豊田市全体の8.9%）で人口密度は約32人/km²である。地区内の標高は100mから868m、森林面積は地区全体の約82%を占めており⁸⁾、山に囲まれた地区であり道路は地形に沿う形でつながっている。

分析には、対象地区の実際の道路網、居住者分布を用いる。道路網は、市販のGIS用道路網データ⁹⁾を用いる。居住者分布は、国勢調査人口をベースに100mメッシュ人口を推計した市販のデータ¹⁰⁾を用いる。

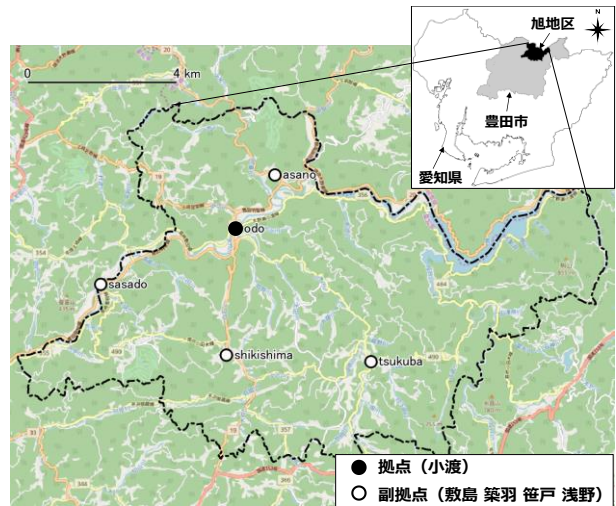


図-1 検討対象地区

(2) 分析にあたっての条件設定

分析にあたり、対象地区に自動運転車を導入する姿として次のように設定する。

- 対象地区内で完結する移動を対象とする自動運転対応道路網の整備を想定する。
- 導入する自動運転車の運用方法は考慮しない。つまり自家用車と公共交通事業用車の区別をしない。自動運転対応道路の整備量のみを考慮する。
- 居住地（人口>0人のメッシュ）から最寄りの拠点（市役所の支所の所在地）または副拠点（集会所の所在地）まで到達できるハブアンドスポーク型の道路網を考える。
- 副拠点を設ける場合には、副拠点から拠点を結ぶ経路も自動運転対応道路として整備することとする。副拠点の数は、地区の実態を踏まえて2か所と4箇所の2種類を想定し、副拠点なしも含めた全体で3種類の道路網を検討する。
- 整備の優先度を評価する指標（優先度指標）には「経路を整備することで自動運転車の利用が可能となる人口（利用可能人口）」と「利用可能人口を拠点から居住地までの全経路の距離で除した値（距離あたり利用可能人口）」を用いる。前者は遠方でも人口が多い集落を結ぶ経路を優先し、後者は集落までの距離と人口の多さの両方を考慮した経路を優先する考え方である。

(3) 自動運転対応道路整備順序の決定手順

経済的観点からは、自動運転対応道路の整備延長は短い延長で多くの人々が利用できることが望ましい。本稿では、拠点または副拠点を起点として、優先順位の高い区間を機械的に選んで整備を進める方法で延長を計算する。その手順は以下のとおりである。図-2に手順のイメージを示す。

- Step-1：拠点または副拠点から居住地まで最短距離となる経路をGISで計算する。その際、地区外の道

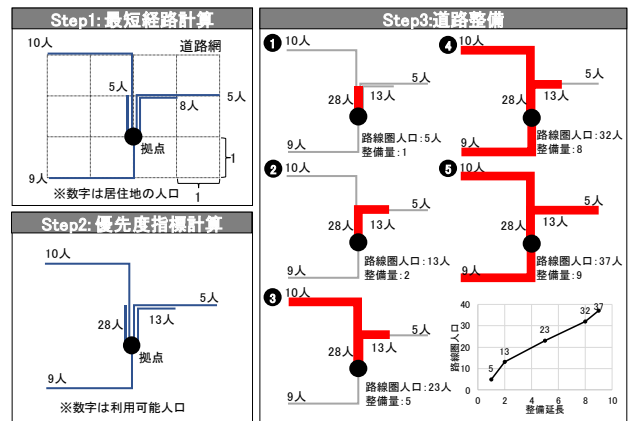


図-2 整備順序決定手順（優先度指標：利用可能人口）

路を経由するほうが最短経路となる場合があるため一部地区外の道路も対象にしている。副拠点を設ける道路網では、拠点と副拠点を連絡する区間を優先的に整備する。拠点と副拠点を連絡する区間の延長は、拠点数3箇所で約11km、拠点数5箇所では約19kmである。

- Step-2：優先度指標を計算する。居住地から拠点までの経路を利用する利用可能人口（または距離あたり利用可能人口）を区間ごとに集計して算出する。
- Step-3：優先順位は、優先度指標を用いて判定し、優先度指標の大きな区間から整備を進める。ここで、整備によって自動運転車が利用可能となる人口を「路線圏人口」と呼ぶ。

拠点や副拠点を起点として自動運転対応道路の整備を進めるにつれて、路線圏人口が増加する。路線圏人口の増加は、道路網の種類（1箇所、3箇所、5箇所）と評価指標の違い（利用可能人口と距離あたり利用可能人口）によって異なる。これらの違いを考慮して、自動運転対応道路の整備延長と路線圏人口の関係を分析する。

3. 結果

(1) 全居住地をカバーするための整備延長

全居住地をカバーするために必要となる自動運転対応道路の整備延長の算出結果を表-1に示す。この場合、優先度指標による差はないため拠点数の違いのみを示す。

表-1 全居住地をカバーするための整備延長

拠点数(箇所)	1	3	5
整備延長 (km)	155.6	149.5	143.6
整備延長あたり路線圏人口(人/km)	17.0	17.7	18.4

最も延長が長いのは拠点数1箇所の156kmである。GISから算出した旭地区の全道路延長314kmの半分程度の距離にあたる。拠点数を増やすと延長が短くなり、3箇所では150km、5か所では144kmとなる。各居住地から一つの拠点を最短経路で結ぶ場合と比べて、副拠点を設けることは利用者を集約するため、整備延長が短くなる。

整備延長あたりの路線圏人口は拠点数1箇所の時に最小となる17.0人/kmである。拠点数3箇所では17.7人/km、5箇所では18.4人/kmである。

拠点数別の自動運転対応道路網を図-2,3,4に示す。なお、これらの図では拠点間を連絡する経路を利用する人の数は表示していない。

ここで、整備延長あたりの路線圏人口の評価の参考とするため、旭地区を含む豊田市全体と、豊田市に近い大都市である名古屋市において、総人口を総道路延長で除した値と比較する。豊田市全体では125人/kmであり、政令市である名古屋市では346人/kmであった。人口密度の低い中山間地では都市部を含む地域よりも値が小さくなることは当然であるが、自動運転対応道路の整備を検討する際の都市部と中山間地との条件の違いを把握できる。

また、整備延長のうち約7割が車道幅員5.5m未満の道路である。これらの道路を自動運転対応道路として整備するには、先に挙げた高精度3次元地図や磁気マーカーだけでなく、部分的な幅員拡幅などの道路改良や路面標示の再整備などが必要となる可能性がある点も留意が必要である。

(2) 整備延長と路線圏人口の関係

次に、自動運転対応道路の整備延長と路線圏人口の関係を分析する。図-5に優先度指標に利用可能人口を用いたcase11,12,13、図-6に距離あたり利用可能人口を用いたcase21,22,23の結果を示す。なお、比較のため図-5にはcase23の結果を、図-6にはcase11の結果を示している。

全体の傾向として、整備延長の増加につれて単調に路線圏人口が増加する右肩上がりの関係にある。優先度指標に「距離あたり利用可能人口」を用いたcase21,22,23では、「利用可能人口」を用いたcase11,12,13よりも、全体的に同じ整備延長でも路線圏人口が多い傾向にある。また、拠点数が多いほうが同じ整備延長でも路線圏人口が多い傾向にある。ただし、case11とcase12やcase13の関係に着目すると、整備延長40kmあたりで大小関係が逆転している。これは、case12やcase13では拠点と副拠点を連

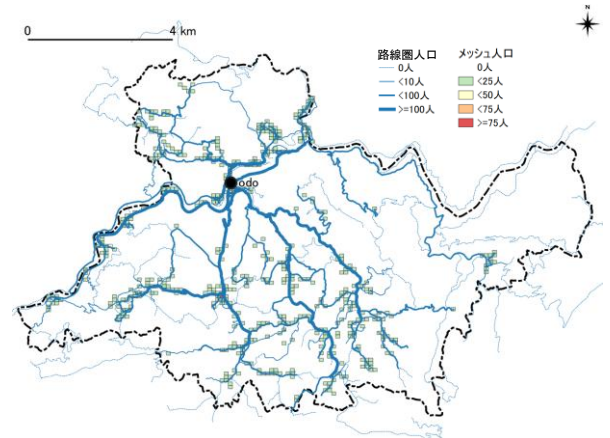


図-2 居住地から拠点を結ぶ道路網 (拠点数1箇所)

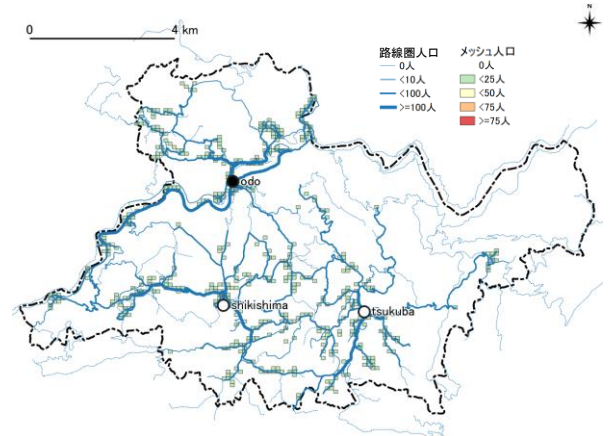


図-3 居住地から拠点を結ぶ道路網 (拠点数3箇所)

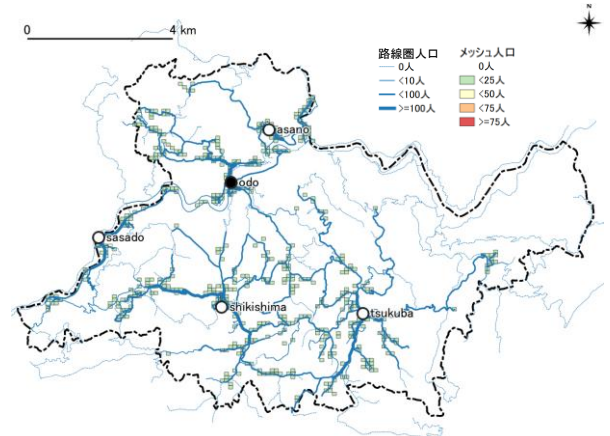


図-4 居住地から拠点を結ぶ道路網 (拠点数5箇所)

絡する経路を優先して整備したことが影響している。

このことから、予算制約等によって一度に整備できる延長に限られる場合、副拠点を結ぶための道路整備を優先するために路線圏人口が少なくなる可能性も存在する。そのため、一度に整備できる延長を考慮した拠点の設定が必要であることがわかった。

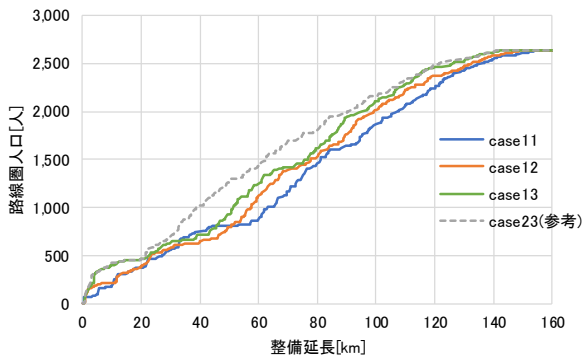


図-5 整備延長と路線圏人口の関係
(優先度指標：利用可能人口)

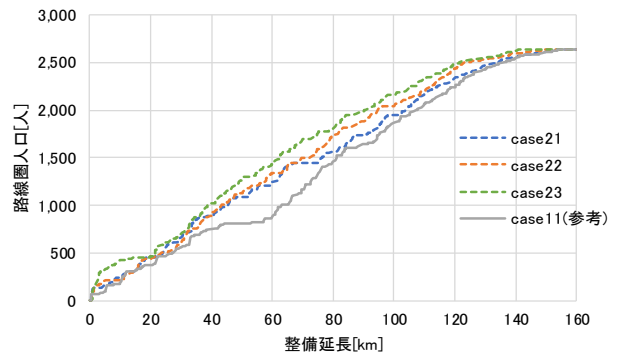


図-6 整備延長と路線圏人口の関係
(優先度指標：距離あたり利用可能人口)

表-2 路線圏人口割合と整備延長の関係

優先度指標 拠点数(箇所)	利用可能人口			距離あたり利用可能人口		
	1	3	5	1	3	5
ケース名	case11	case12	case13	case21	case22	case23
表の値	case11の整備延長との差					
全人口の0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
全人口の20%	28.2	-3.5	-4.6	-4.7	-1.2	-6.7
全人口の40%	66.1	-8.2	-13.4	-20.0	-20.5	-25.0
全人口の60%	83.7	-2.8	-4.6	-2.2	-9.0	-18.1
全人口の80%	112.6	-8.4	-12.9	-5.5	-9.3	-16.1
全人口の100%	155.6	-6.1	-11.9	0.0	-6.1	-11.9

単位:km

表-2に、路線圏人口の割合に対応するcase11の整備延長と他のケースのcase11の延長との差を示す。case11の整備延長との差が最も大きくなるのは、路線圏人口の割合が40%時のcase23であり、約25km (38%) 少ない整備延長で同じ人口をカバーできることがわかる。

また、ほとんどの場合全体的にcase12,13と比べてcase22,23の整備延長が短い、路線圏人口の割合が20%の時はcase22よりcase12の方が差が大きく、大小関係が逆転している。これは優先度が「距離あたり利用可能人口」の場合は、居住地までの経路の距離が短い場合に優先度が高くなることが影響している。このことから、優先的に整備する区間を検討する際は、目標とする路線圏人口（サービス対象範囲ともいえる）によって優先度指標を使い分けることで、より効率的な整備が可能となることを示唆している。

図-7,8,9に路線圏人口割合別の道路整備区間を示す。ここでは比較のため、最も整備延長が長いcase11と、整備延長が短いcase23、そして優先度指標による経路の違いを見るためcase13の図を示す。

図-7と図-8の違いから、複数拠点を設けることの影響を確認できる。図中のAやBの経路は、拠点が1箇所のcase11では長い距離を経由して拠点から集落到達しているが、拠点数が5箇所のcase13では近隣の副拠点を經由する経路Cに変わっている。

図-8と図-9の違いから、優先度指標の違いによる影響を確認できる。case13とcase23で利用する経路は変わらないが、整備の優先順位が変わる。図中のCの経路は、図中のCの経路は、整備延長が長い、利用可能人口が多

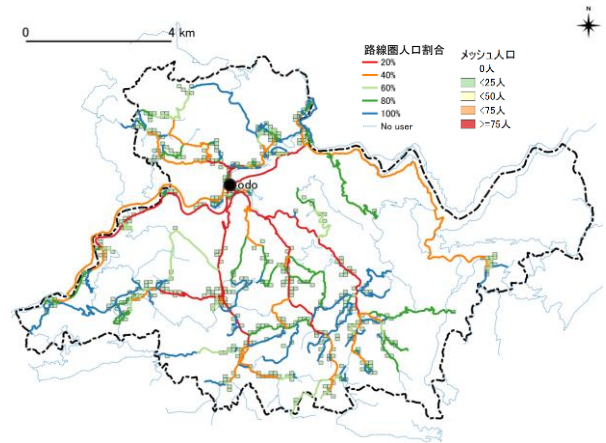


図-7 路線圏人口割合別道路整備区間 (case11)

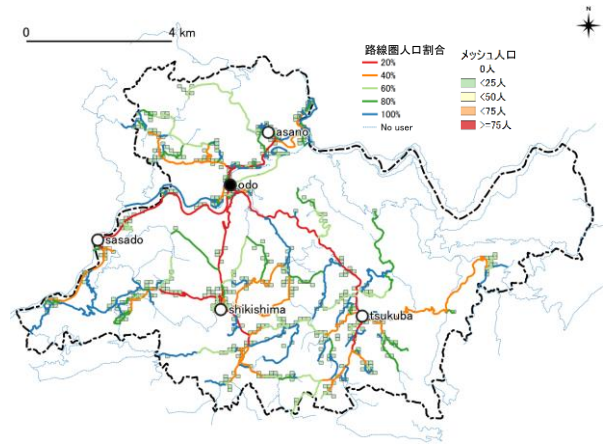


図-8 路線圏人口割合別道路整備区間 (case13)

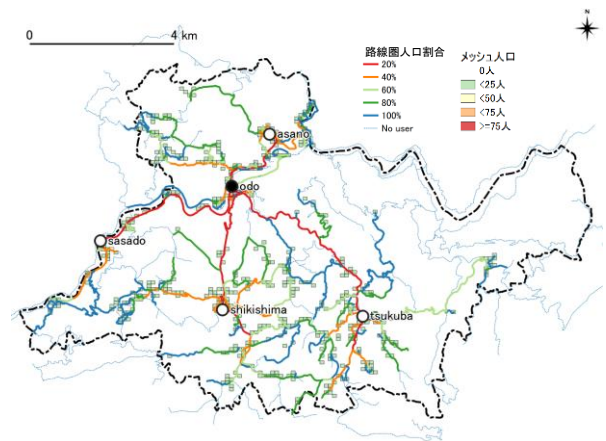


図-9 路線圏人口割合別道路整備区間 (case23)

いため、case13 (図-8) では路線圏人口割合を40%とする整備を行う際の対象に含まれるが、case23 (図-9) では路線圏人口割合が60%時の対象路線となっている。Dの経路でも同様の変化が見られる。

(3) 整備延長と距離あたり路線圏人口の関係

整備延長が長くなるほど路線圏人口が大きくなる一方で、効率的な整備のためにはより少ない延長でより多くの人口をカバーすることが求められる。そこで、路線圏人口を自動運転対応道路の整備延長で除した値と整備延長の関係进行分析する。結果を図-10,11に示す。なお、比較のため図-10にはcase23の結果を、図-11にはcase11の結果を示している。

整備延長あたり路線圏人口は、最大でcase21の164人/kmとなるが、その時の整備延長が0.7kmであり路線圏人口は100名程度に限られる。拠点の個所数が1箇所や3箇所の場合は、整備延長が10km程度になると値が20人/kmで落ち着く。5箇所の場合は整備延長が20km程度で値が20人/kmで落ち着く。今回想定した道路網は拠点を起点としており、拠点周辺には比較的多くの人口が居住している場合が多いため、このような関係になると考えられる。

このような整備延長あたり路線圏人口の特性を活用して、自動運転の導入を目指す地域において目標となる路線圏人口を検討する際のひとつの目安として活用できる可能性がある。

4 おわりに

本稿では、中山間地における自動運転車の導入に向けた自動運転対応道路の整備優先順位の設定手法を提案し、愛知県豊田市旭地区の実際の道路網と人口分布を用いて自動運転車の路線圏人口と、自動運転対応道路の整備延長の関係を分析した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・中山間地である旭地区で全居住者が利用できる自動運転対応道路を整備した場合、整備延長あたりの路線圏人口は最大で18.4人/kmである。この値は都市部を含む地域である豊田市全域や政令市の名古屋市と比較して一桁小さい。都市部と中山間地との条件の違いを示した。
- ・道路整備延長は副拠点の箇所数が多いほど短くなる傾向がある。ただし、路線圏人口を全人口ではなく一部に限定した場合は、つまり一度に整備できる延長に制約がある場合には、副拠点間を結ぶための道路整備を優先するために路線圏人口が少なくなる可能性がある。そのため、可能となる整備量の制約を考慮した拠点設定が必要である。

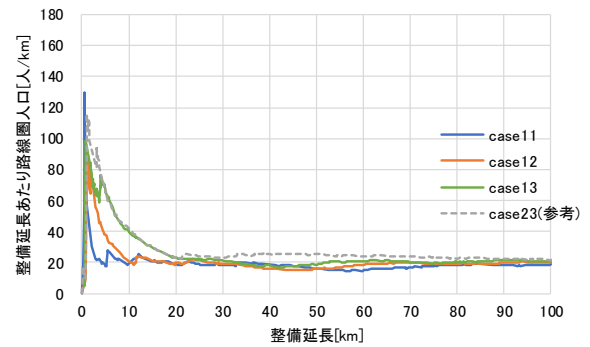


図-10 累積整備延長と距離あたり路線圏人口の関係
(優先度指標：利用可能人口)

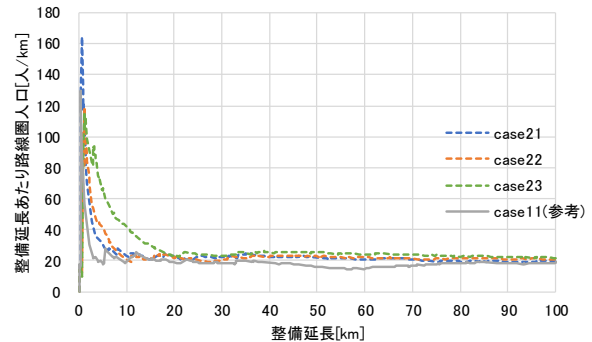


図-11 累積整備延長と距離あたり路線圏人口の関係
(優先度指標：距離あたり利用可能人口)

- ・優先度として距離あたり利用可能人口を用いるほうが整備量が少なくなる傾向があるが、整備延長に制約がある場合は、路線圏人口が少なくなる可能性がある。このことから、整備量の制約を考慮した優先度指標の使い分けの必要性が示唆された。
- ・整備延長あたりの路線圏人口は、一定の整備延長を越えると収束する傾向を確認した。目標とする路線圏人口を検討する際のひとつの目安として活用できる可能性がある。

今後の課題として、次のことがある。まず、本稿では、すべての道路を候補としているが、車道の幅員や沿道施設の立地、利用者の集約可能性なども考慮した経路探索が考えられる。次に、最短経路のみならず経路の共通利用の考慮、最適化手法の導入により、より効率的な道路整備が期待できる。また、本稿の対象地域が中山間地であることからハブアンドスポーク型の道路網を想定したが、拠点の設定方法を工夫することで、格子型や放射・環状型の道路網を検討することも考えられる。さらに、本稿では単純に整備延長のみについて評価したが、導入する自動運転車の運用方法（自家用車とするのか、SAVsのような共同利用用の車とするのか）、必要となる車両数などの考慮が挙げられる。今後はこれらの観点も加えた分析を進めることが求められる。

補注

- (1) 高精度 3 次元地図や磁気マーカーを利用せず、GNSS による位置情報のみで自動走行する技術の研究開発も進められている。しかし特に中山間地においては、GNSS 測位は樹木やトンネル、地形の影響を受けやすいことから、自動運転対応道路の必要性は高いと言える。

参考文献

- 1) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議：官民 ITS 構想・ロードマップ 2019.
- 2) William Larson, Weihua Zhao: Self-driving cars and the city: Effects on sprawl, energy consumption, and housing affordability, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 81, 2020.
- 3) Mourad, A., Puchinger, J. & Chu, C. Owing or sharing autonomous vehicles: comparing different ownership and usage scenarios. *Eur. Transp. Res. Rev.* 11, 31, 2019.
- 4) Zhibin Chen, Fang He, Yafeng Yin, Yuchuan Du: Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks, *Transportation Research Part B: Methodological* Vol. 99, 2017.
- 5) Xiao Liang, Gonçalo Homem de Almeida Correia, Bart van Arem: Optimizing the service area and trip selection of an electric automated taxi system used for the last mile of train trips, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 93, 2016.
- 6) 山本真之, 梶大介, 服部佑哉, 山本俊行, 玉田正樹, 藤垣洋平: 自動運転車によるシェアカーの普及に関する研究, 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集, 2016.
- 7) 香月秀仁, 東達志, 谷口守: 郊外間交通へのシェア型自動運転車の導入可能性 - トリップの時空間特性・個人属性の観点から - : 都市計画論文集, Vol.52, No.3, 2017.
- 8) 豊田市役所旭支所: 旭あれこれガイドブック, 2013.
- 9) ESRI ジャパン株式会社: ArcGIS Data Collection 道路網 2016 愛知県版.
- 10) 株式会社ゼンリンジオインテリジェンス: 平成 27 年国勢調査 100m メッシュ推計データ.

(2020.3.? 受付)

AN ANALYSIS ON ESTIMATION OF THE NECESSARY LENGTH OF
NETWORK IMPROVEMENT FOR AUTONOMOUS VEHICLES IN
MOUNTAINOUS AREA
- PROPOSAL OF ROUTE PLANNING METHOD -

Yasuhide NISHIHORI, Sunyong EOM