

# 灯油配送計画の最適化に向けた道路ネットワークの階層化手法の検証

清水 雅之<sup>1,a)</sup> 横山 想一郎<sup>2,b)</sup> 山下 倫央<sup>2,c)</sup> 川村 秀憲<sup>2,d)</sup>

概要：本稿では、灯油配送計画の最適化に向けた経路探索の計算時間の削減とドライバーの細街路に対する忌避を考慮した経路探索を実行するための道路ネットワークの階層化手法を提案する。提案手法の効果を検証するために、札幌駅を中心とする7km四方の道路ネットワークにおいて、異なる度合いの細街路への忌避を持つ複数種類のドライバーを設定した計算機実験を行った。実験の結果、提案手法を適用した経路探索は、経路探索の計算時間と求められた経路のコストに関して従来手法を上回ることを確認した。また、従来手法を適用した場合に最短経路に対して著しくコストの大きい経路が得られてしまうODペアに対して、提案手法が最短経路とほぼ同等の経路を求める例を示した。

## Verification of a road network hierarchy method for optimization of kerosene delivery planning

### 1. 序論

北海道を中心とする北日本における寒冷地の戸建てには暖房やロードヒーティングに使用する灯油を貯蔵するタンクが設置されており、灯油配送業者が定期的に配送をおこなうことで灯油を切らさずに暖房などを使用し続けることができる。通常、灯油配送業者は顧客と定期配送契約を結び、灯油配送のタイミングを配送業者側が灯油タンクを空にしないように配送を行う。灯油配送業者がどのタイミングでどの顧客に配送するかをまとめたスケジュールは灯油配送計画と呼ばれる。灯油配送経路問題の目的は、複数のタンクローリーの配送タイミングを調整して、近隣の顧客をまとめて給油することで移動距離を減らしたり、また、顧客の灯油タンクを空にすることなく一度にできるだけ多く給油することで配送回数を減らして灯油配送に費やす時間

を短くすることである。我々は、この灯油配送計画を在庫配送計画問題として捉えて最適化問題として定式化して、実際の灯油の消費量を反映させた問題に対して、タブーサーチを用いた近似解法の開発を進めている [1]。

近似解法の適用に当たって配送拠点及び顧客間の経路の距離情報が必要となり、現状では経路の距離情報としてユークリッド距離を使用している。実際の道路ネットワークの最短距離経路長を用いることが望ましいが、経路探索アルゴリズムであるダイクストラアルゴリズム [2] や A\* アルゴリズム [3] を適用すると、対象地域の拡大や顧客数の増加に伴って、経路探索に膨大な計算時間がかかってしまうため、実応用を踏まえると適切な方法とは言えないがユークリッド距離を使用している。

灯油配送計画における経路探索においては、経路長の計算時間の他にも、配送員の積雪した細街路に対する忌避感を考慮する必要がある。灯油配送は寒冷地で主に冬季が繁忙期となるため、タンクローリーは雪道の走行が求められるが細街路は冬場において除雪が行き届いていない場合が多い。灯油を積載したタンクローリーの除雪されていない細街路の走行はスタックの危険性があり、配送ドライバーは路面状況次第で細街路を避けた経路を選択することが多い。そのため、タンクローリーのドライバーが積雪・降雪状況に合わせて細街路を回避する行動を経路探索に反映する

<sup>1</sup> 北海道大学 大学院情報科学院  
Graduate School of Information Science and Technology,  
Hokkaido University, Kita 14, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo 060-0814, Japan

<sup>2</sup> 北海道大学 大学院情報科学研究院  
Faculty of Information Science and Technology, Hokkaido  
University, Sapporo, Japan

a) s.masayuki\_0426@ist.hokudai.ac.jp

b) yokoyama@ist.hokudai.ac.jp

c) tomohisa@ist.hokudai.ac.jp

d) kawamura@ist.hokudai.ac.jp

必要がある。

灯油配送計画の最適化に向けて、経路選択における細街路に対する忌避感を考慮しつつ、経路探索を高速に行うための手法が必要とされている。本稿では、エージェントの多様性という形式で細街路に対する忌避感を実装している階層的経路探索アルゴリズムを扱っている従来研究 [4] を踏まえて、灯油配送計画の最適化により適した手法の提案を行う。

本稿の構成を以下に示す 2 章では関連研究と本研究の位置づけを明確にし、3 章で提案手法の説明を行う。4 章では札幌駅周辺を対象とした大規模な道路ネットワークを使用した実験を行い、得られた経路の性質と計算時間を従来手法と比較する。最後に 5 章で結論を述べる。

## 2. 従来手法と本研究の位置づけ

### 2.1 階層的経路探索

階層的経路探索アルゴリズムにおいて、階層化を行う方法は大きく 2 種類あり、ひとつは分類による階層化であり、もうひとつが凝集による階層化である。本章ではこれらの 2 つの階層化の従来手法を概観する。

#### 2.1.1 分類による階層化

分類による階層化は、高速道路、国道、県道、市道といった道路種別や車線数といった各道路の持つ属性を利用して階層レベルを分ける。福田ら [4] はどのドライバーにとっても同一の属性となる固定属性と経路探索を行うドライバーごとに異なることを許容する属性である可変コストの 2 つを定義して、固定属性によって道路ネットワークの階層化を行い、可変コストによって経路探索を行う経路探索アルゴリズムを提案している。

福田らは、一般的なドライバーは車線数が大きい道路を優先して走行するという先行研究 [5], [6] に基づいて、固定属性として車線数を与えている。また、車線数による階層化において、分類初期の上位ネットワークは多くの場合、非連結となるため、この非連結性を解消するために上位ネットワークの補正が必要となる。福田らの手法では、補正の際にどの程度離れた距離の異なるサブネットワークを連結するかを制御する閾値である  $H_{max}$  を定義して、 $H_{max}$  を変化させることで異なる性質を持つ階層化ネットワークを構築可能としている。

細街路に対する忌避感をエージェントの多様性として表現して、階層化手法の有効性の検証を行い、細街路に対する忌避感の強さの異なる 3 種類のドライバーに対して、同一の階層化ネットワークを用いて有効な経路探索結果を出力可能なことを確認している。

ただし、階層化ネットワークの性質を決定するパラメータである  $H_{max}$  に関して、出発地 (Origin) と目的地 (Destination) のペアである OD ペアによっては  $H_{max}$  が小さい場合に最短距離経路と比較して大幅な遠回りが発生し、

$H_{max}$  を大きくすることで遠回りが緩和されたという結果が述べられている。しかし、道路ネットワークや特定の OD ペアに対しては、 $H_{max}$  に関わらず階層化ネットワークを使用することにより、出力された経路が最短距離経路と比較して大幅な遠回りとなってしまう場合があるのがこの手法の問題点として挙げられる。

#### 2.1.2 凝集による階層化

凝集による階層化は道路ネットワークに対してコミュニティ検出法を適用し、検出された各コミュニティを新しいノードと捉えてネットワークを構築し、一つ上の階層レベルにおく。同様の処理を指定した階層レベルの数だけ行うことで階層化を行う手法 [7], [8], [9] である。

Mahyar ら [8] は、コミュニティ検出法の中で高速でかつ精度の高い手法である Louvain 法 [10] を用いたコミュニティ検出を行うことで階層化を行っている。また、この論文では混雑状況を加味した階層化を実現するためにネットワークのリンクコストに旅行時間あるいは混雑状況を与えている。これにより、周辺ノードの中で同じ混雑状況にあるノード同士を同じコミュニティにまとめることが可能となり、混雑状況を加味した階層化を実現可能としている。

Mahyar らは分類による階層化の欠点として、混雑状況を考慮せずに上位階層のリンク (高速道路など) 上への移動を優先してしまうことを挙げている。高階層では制限速度が高い場合が多く、混雑がないときには最適な経路となるしれないが、混雑や事故が発生した際には必ずしも最適な経路とは限らない。一方で、凝集による階層化は、階層化の際に混雑状況を加味した階層化ネットワークの構築によって分類による階層化の持つ問題点を解消する。

## 3. 提案手法

### 3.1 提案手法の位置づけ

本論文は灯油配送計画の最適化において、計算速度が速く、ドライバーの細街路に対する忌避感を考慮した経路探索を実現することを目指す。1 で述べたように、ドライバーは路面状況に応じて細街路を避けた経路を選択する必要があるため、ドライバーの細街路に対する忌避感の違いをエージェントの多様性とみなす。

本論文では道路ネットワークの各リンクの車線数に応じて階層化を行い、エージェントの多様性に対して有効性を持つ福田らの手法 [4] をベースに階層化手法を提案する。具体的には、2.1.1 で挙げた階層化ネットワークを用いて経路探索を行った際に特定の OD ペアに対して、 $H_{max}$  の変化によって大幅な遠回りが発生する場合がある問題点を解消する。更に経路のコストを悪化させることなく計算時間を短縮させることを目指す。そのために、従来手法によって得られる階層化ネットワークに対して追加の補正を加えることで階層化ネットワークを更新する。

### 3.2 道路ネットワークの階層化

提案手法では、車線数が3以上のリンクからなる道路ネットワークに対して更にノード及びリンクを追加する。提案手法では補正を加える際に、対象となる道路ネットワークが連結していることが条件であるが、元の道路ネットワークから車線数が3以上のリンクのみを抽出すると多くの場合非連結となるため、解消する必要がある。従来手法を用いることによって道路ネットワークの非連結を解消することができる。

提案手法では、 $H_{max} = 30$ 、階層レベル3の道路ネットワークにノード及びリンクを追加する。提案手法の狙いは、上位ネットワークの補正の際に、車線数だけでなく各ノード及びリンクの重要性を考慮して追加を行うことである。各ノード及びリンク重要性とは、道路ネットワーク内の任意のODペアの最短距離経路を考える際にそのノード及びリンクが経由される割合である。

従来手法の階層化における上位ネットワークの補正は、主に上位ネットワーク抽出時のネットワークの非連結を解消することであり、その際に追加するノード及びリンクに関してその重要性の考慮はされていない。そのため、従来手法では重要性の低いノード及びリンクが上位のネットワークに追加され、重要性の高いノード及びリンクが追加されない場合が生じる。提案手法は従来手法とは異なり、車線数2であっても階層レベル2のネットワーク $G_2$ に含まれていないリンクが存在する。これは、提案手法が車線数に加えてリンクの重要性も考慮しているためである。

以下に具体的なネットワーク補正の手順を示す。提案手法の上位ネットワークの補正には、従来手法から $H_{max} = 30$ 、階層レベル3のネットワークと $H_{max} = 100$ 、階層レベル2のネットワークを使用する。なお、補正は $H_{max} = 30$ 、階層レベル3のネットワークを補正対象のネットワーク $G'$ として始める。以下に示す手順は2試行行い、1試行目のStep 5終了時のネットワーク $G'$ を提案手法における階層レベル3のネットワーク $G_3$ とし、2試行目のStep 5終了時のネットワーク $G'$ を提案手法における階層レベル2のネットワーク $G_2$ とする。

**Step 1:**  $G'$ に対してLouvain法を適用し、道路ネットワークのコミュニティを検出する。

**Step 2:** Step 1で検出された各コミュニティ内のノードの中で媒介中心性が最も大きいノードを求める。

**Step 3:** Step 2で求めた各ノードの中で、ユークリッド距離が $p_1$ [m]以下となるノードのペアを抽出する。

**Step 4:** Step 3で抽出された各ペアに対して $G'$ を用いて双方向探索A\*アルゴリズムを実行し、走行距離が(ペア間のユークリッド距離) $\times p_2$ [m]以上となるようなペアを抽出する。

**Step 5:** Step 4で抽出された全てのペアに対して $H_{max} = 100$ 、階層レベル2のネットワークを用い

表 1: 階層化アルゴリズムとパラメータ  
Table 1 Hierarchical algorithm and parameters

Algorithm	$N$	$H_{max}$
Conventional method	3	30
	3	40
	3	50
	3	60
	3	70
	3	80
	3	90
Proposed method	3	100
	3	-

て双方向探索A\*アルゴリズムを適用し、求められた経路に含まれるノード及びリンクを $G'$ に追加する。

Step 2での媒介中心性とは注目しているノードがそれ以外の2つのノード間の最短経路にどのくらいの割合で入っているかを数値化したものであり、媒介中心性の大きいノードは対象の道路ネットワークにおいて重要性の高いノードであると考えることが出来る。Step 3, 4における $p_1, p_2$ はパラメータである。 $p_1$ は、補正の際にLouvain法により検出されたコミュニティの中で、どの程度の離れたコミュニティ同士を結合させるかを定める。このパラメータは、従来手法における $H_{max}$ と似た役割を持つパラメータである。 $p_1$ の値が小さければ近いコミュニティ間を対象として補正を行い、大きくすることでより遠いコミュニティ間まで対象として補正を行うため、追加されるノード及びリンクが増加し、ネットワークはより細くなるが補正にかかる時間も増加する。 $p_2$ は対象のコミュニティ間に新たにノード及びリンクを追加するかを決定するパラメータである。Step 4では補正対象のネットワークである $G'$ を用いて対象のペア間の経路及び経路長を求めるが、これがペア間のユークリッド距離からどれくらいの誤差であれば新たにノード及びリンクをしなくても良いかを定めるのが $p_2$ である。この値が1に近いほど許容できる誤差が小さくなり、新たなノード及びリンクの追加が必要となり、それに伴って前処理時間が増加する。

## 4. 実験

日本国内の豪雪地帯の道路ネットワークに対し、提案手法及び従来手法による階層化を行い、計算時間及び構築された階層化ネットワークを比較する。各手法による階層化ネットワークを用いて、道路ネットワークの任意の2地点の近似最短経路を探索し、探索の計算時間及び最短経路に対するコストの増分を評価する。

### 4.1 実験設定

冬季の降雪量が大きく灯油配送が日常的に行われている地域として、札幌駅を中心とする7km四方の範囲をOpen-

表 2: 階層化手法の比較に用いる OD ペアの抽出数  
Table 2 Number of OD pairs extracted for comparison of hierarchical methods

	OD Euclidean distance [km]			
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20
Number of OD pairs	5000	3000	2000	300

表 3: エージェントごとのリンク通過コスト  $w_{e,n}$   
Table 3 Values of  $w_{e,n}$  for link passing cost of each agent

Agent	Number of lanes		
	$l_e = 1$	$l_e = 2$	$l_e \geq 3$
$A_1$	10	5	1
$A_2$	4	2.5	1
$A_3$	2.768	1.607	1
$A_4$	1	1	1

StreetMap[11] より抽出し、実験対象の道路ネットワークとする。OpenStreetMap の道路ネットワークに付与されている車線情報及びリンク長を取得し、ネットワークの階層化及び経路コストの算出に使用する。

福田らによる階層化手法 [4] 及び 3.2 で提案した手法により階層化ネットワークを構築する。各手法のパラメータは表 1 に示す通りとし、それぞれの条件で構築されたネットワークの規模及び近似最短経路探索における有効性を比較する。

各手法により構築された階層化ネットワークを用いて、道路ネットワーク上の 2 地点の近似最短経路を探索し、得られた経路により階層化手法を評価する。同じ 2 地点間について片方向及び 2 方向の A\* アルゴリズムを用いた経路探索を行い、経路長及び探索の計算時間を比較する。

経路の出発地点及び目的地点を示す OD ペア群を道路ネットワークからあらかじめ抽出し、経路の探索及び評価に用いる。出発地点と目的地点の間のユークリッド距離を 4 区間に分割し、それぞれの区間で表 2 に示す数だけ無作為に OD ペアを抽出する。従来手法において、階層化ネットワークを利用して得られる近似最短経路は、OD ペア間のユークリッド距離が小さいほど、遠回りが発生し厳密な最短経路と比べコストが増加する傾向にあることが判明している。このため、本実験ではユークリッド距離の小さい OD ペアを多く抽出することとした。

階層化ネットワークを用いた近似最短経路の探索と評価は、従来手法と同様に、細街路の通行に対する忌避の度合いが異なる複数のエージェントについて実施する。エージェント  $A_n$  についての経路の探索及び評価において、リンク  $e$  の通過コスト  $c_{e,n}$  を、道路ネットワークにおける  $e$  のコスト  $c_e$  を用いて式 (1) の通り設定する。

$$\tilde{c}_{e,n} = w_{e,n} c_e \quad (1)$$

細街路を選択する傾向の強い順に 4 種類のエージェントを

設定し、表 3 に示す通り  $w_{e,n}$  を与える。ここで、 $l_e$  は  $e$  に対応する道路の車線数を表す。

$A_1, A_2, A_3$  は福田らの手法で用いられた値をそのまま使用し、本論文では  $A_4$  を追加している。追加したエージェントは他の 3 種類のエージェントとは異なり細街路を忌避しない。このエージェントを追加した目的は、細街路に関するこだわりを持たないエージェントに対する階層化手法の有効性を検証するためである。特に、階層化手法を用いることによる最短距離経路からの経路長の増加を検証するためである。他の 3 種類のエージェントを用いた場合は、細街路を回避した経路が選択されるため階層化手法に依らず出力された経路の経路長は長くなり、出力された経路の経路長に対する階層化手法の影響の評価が難しい。一方で、細街路に関するこだわりを持たないエージェントを用いることで出力された経路の経路長と最短距離経路の比較が可能となる。

## 4.2 階層化ネットワーク構築の結果

従来手法及び提案手法で階層化ネットワークを構築した結果を表 4 に示す。各手法において  $n = 1$  の場合は、全てのノード及びリンクを含む道路ネットワークが用いられる。 $n \geq 2$  の場合は、手法やパラメータにより異なる規模のネットワークが構築される。従来手法については  $H_{max}$  が大きくなるほど各階層のネットワークのノード数及びリンク数が増加するため、最大値及び最小値を取る  $H_{max} = 30, 100$  の場合を示した。また、提案手法において階層レベル 2 のネットワークに含まれるノード数及びリンク数を従来手法と比較した場合、その数が最も少なくなる従来手法の  $H_{max} = 30$  の場合と比べて約 53% 少ない。

従来手法による階層化ネットワーク構築の計算時間は  $H_{max}$  が大きいほど増加する。本研究で取り扱う  $H_{max}$  の値の中で最大の  $H_{max} = 100$  では、計算時間は約 4 分である。提案手法の計算時間は同程度の約 4 分であり、灯油配送計画においては道路ネットワーク情報が変更された場合のみに階層化ネットワークの構築が必要とされることを踏まえると、十分に短い計算時間といえる。

図 1 に提案手法を用いて階層化を行った結果を示す。図 1 における青、緑、赤色のリンクはそれぞれ車線数が 1, 2, 3 以上のリンクを表す。また、各手法により構築された階層化ネットワークの比較を行うために、特に顕著に違いの生じている階層レベル 2 の階層化ネットワークを図 2 に示す。図 2 より、従来手法において  $H_{max}$  の増加に伴い階層レベル 2 に含まれるノード数及びリンク数が増加していることが見てとれる。また、従来手法と提案手法の階層化ネットワークを比較した場合、提案手法の方が階層化ネットワークの抽象度が高いことが確認できる。これは、従来手法では階層レベル 2 の階層化ネットワークに車線数 2 のリンクが全て含まれているのに対して、提案手法では車線



表 4: 階層化手法により構築されるネットワークの規模と階層化の計算時間

Table 4 Size and elapsed time of the graphs constructed by each method

Algorithm	$H_{max}$	$n$	Number of nodes	Number of links	Elapsed time [s]
Original road network	-	1	30,944	95,826	-
Conventional method	30	2	8,666	9,543	9.19
		3	1,983	2,016	
	100	2	12,666	15,193	251
		3	4,302	4,586	
Proposed method	-	2	4,095	4,301	221
		3	3,023	3,124	

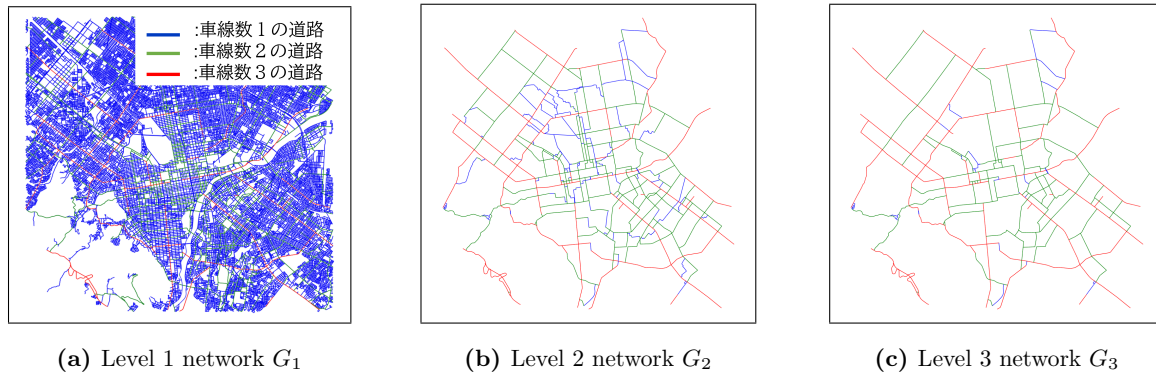


図 1: 提案手法により構築された各階層レベルの道路ネットワーク  
Fig. 1 Road network at each hierarchical level constructed by the proposed method

数 2 のリンクでも階層レベル 2 の階層化ネットワークに含まれていないものが存在するためである。これは、提案手法におけるネットワークの補正では、車線数だけでなくリンクの重要性も考慮してノード及びリンクの追加を行うことに起因する。

#### 4.3 階層化ネットワークによる近似最短経路探索の結果

各手法による階層化ネットワークを用いた近似経路探索及び A\* アルゴリズムによる経路探索を行った。全ての OD ペア距離の区間について類似した結果が得られたため、本節では地点間のユークリッド距離が 5km 未満の OD ペアに限り結果を示す。5km 未満の全 OD ペアについての経路の平均走行距離、平均コスト、及び平均計算時間を表 5 及び図 3 に示す。表 5 における  $T_{ave}$ ,  $C_{ave}$  はそれぞれ 5km 未満の区間における各エージェントごとの計算時間及びコストの平均である。表 5 より、単方向探索 A\* アルゴリズムと比較した平均計算時間は、従来手法は 2~4% 程度まで、提案手法に関しては 2~7% 程度まで減少している事が確認でき、両手法ともに階層化を用いることで全てのエージェントに対する経路探索の計算時間の大幅な短縮が認められた。

平均コストに関しては、単方向探索 A\* アルゴリズムによる最短経路と比較して従来手法による近似最短経路は 2~26% 程度、提案手法は 2~9% 程度悪化している。提案手法による近似最短経路のコストは従来手法によるものと比べ

同程度であり、エージェントの細街路の忌避の度合いによる差は見られなかった。従来手法においては、 $H_{max} = 30, 40$  において平均走行距離、平均コストともに他の  $H_{max}$  の場合の結果と比較して増加していることが確認できる。細街路を忌避する度合いの強い  $A_1$  においては平均コストは 1.2 倍程の増加であり、細街路を忌避しない  $A_4$  においては 1.4 倍程の増加となることから、細街路を忌避しない場合において特に平均コストが大きく増加することわかる。

一方で、図 4 に見られる通り、細街路を忌避しないエージェント  $A_4$  に対し、OD ペア間の最短経路と比べ車線数の大きな道路による経路の長さが非常に大きい場合において、従来手法では最短経路に比べ 2 倍ほどの長さの経路が求められるものの、提案方法では最短経路と比べわずかに長い経路が求められる例が見られた。灯油配送計画の立案において、最短経路と比べ大きく長さの異なる経路が選択されることは、配送の実情との齟齬をきたし立案された配送計画の有用性を損なうことから、提案手法は配送計画立案により適した経路探索に繋がる可能性が示された。

近似最短経路探索の平均計算時間に関しては、全てのエージェントに対して提案手法を用いることで従来手法よりも短縮され、平均コストが同程度である  $H_{max} = 100$  よりも 20~34% 程度減少している。

#### 4.4 考察

従来手法では車線数の大きいリンクは上位階層のネット

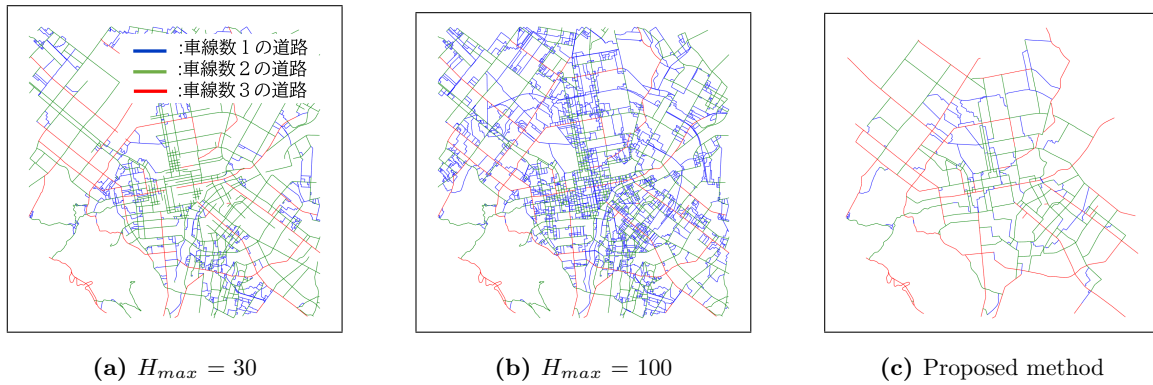


図 2: 各手法により構築された階層レベル 2 の道路ネットワーク  $G_2$

Fig. 2 Hierarchical level 2 road network  $G_2$  constructed by each method.

表 5: 各アルゴリズムを用いた経路探索の結果 (5km 未満)

Table 5 Results of route search using each algorithm. (less than 5 km)

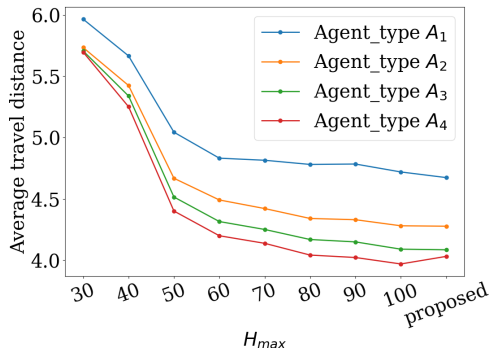
Algorithm	$H_{max}$	Agent type $A_1$		Agent type $A_2$		Agent type $A_3$		Agent type $A_4$	
		$T_{ave}$ [sec]	$C_{ave}$ [km]	$T_{ave}$ [sec]	$C_{ave}$ [km]	$T_{ave}$ [sec]	$C_{ave}$ [km]	$T_{ave}$ [sec]	$C_{ave}$ [km]
Monodirectional-A*	-	0.9689	8.276	0.6237	5.902	0.4664	4.935	0.2541	3.692
Bidirectional-A*	-	0.3434	8.410	0.3048	5.995	0.2424	4.989	0.1665	3.711
Conventional method	30	0.05834	10.44	0.04933	7.546	0.04671	6.554	0.04011	5.696
	40	0.04676	9.327	0.04561	6.943	0.0473	6.116	0.03944	5.251
	50	0.04932	8.725	0.04352	6.311	0.04215	5.395	0.03061	4.401
	60	0.0565	8.753	0.05265	6.220	0.04482	5.241	0.02966	4.199
	70	0.06022	8.494	0.05729	6.118	0.0484	5.167	0.03126	4.137
	80	0.05895	8.598	0.05535	6.118	0.04676	5.122	0.02918	4.041
	90	0.06235	8.441	0.05906	6.084	0.04934	5.096	0.03199	4.021
100	0.06822	8.411	0.0623	6.026	0.05172	5.046	0.03229	3.969	
Proposed method	-	0.05205	8.416	0.04116	6.012	0.03463	5.025	0.02567	4.030

ワークに必ず含まれ、より車線数の小さいリンクが必要に応じて追加される。  $H_{max}$  が大きくなるほど、上位階層のネットワークにより多くの車線数が小さいリンクが追加される。細街路を忌避する度合いの強いエージェントは、走行距離が増加したとしても車線数の大きいリンクを通る経路を通してコストの増加が抑えられる一方で、細街路を忌避しないエージェントは、走行距離を短縮することでのみコストが低減される。  $H_{max}$  が小さい場合には、車線数の大きいリンクが上位階層の多くを占めるため、探索中に上位階層に含まれるノードに到達し、上位階層のネットワークのみでは細街路を通り走行距離が小さい経路が探索できない場合において、細街路を忌避しないエージェントに対するコストの小さい経路の探索ができない。このため、従来手法において  $H_{max}$  が小さい場合は、特に細街路を忌避しないエージェントに対して、近似経路探索の性能が低下したと考えられる。

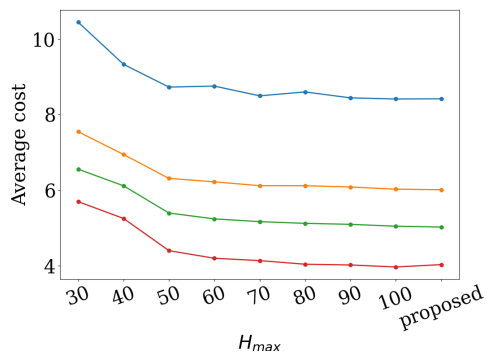
従来手法において、  $H_{max}$  の増加により細街路を忌避するエージェントに対しても平均的にコストの小さい経路を求めることができる一方で、図 4 に見られる通り、OD ペ

アの選択によっては最短経路に対するコストが著しく大きい経路が求められる場合が存在する。灯油配送計画の立案では、得られる経路の平均的なコストが最短経路に近いことだけでなく、最短経路に比べ得られる経路のコスト差が極端に大きい状況の発生を抑えることが求められる。提案手法は、求められる経路の平均コストは従来手法と同程度であるものの、こうした状況の発生頻度が小さい可能性が示唆されており、定量的な評価基準を設定したうえでの比較が今後の課題となる。

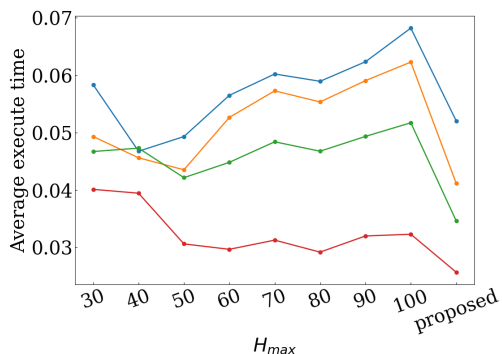
提案手法を用いることにより平均計算時間が従来手法と比較して 20~34%程度減少しているが、この大きな要因は階層レベル 2 のネットワークに含まれるノード及びリンクの数である。表 4 より、階層レベル 2 のネットワークに含まれるノード数及びリンク数を従来手法と比較した場合、その数が最も少なくなる  $H_{max} = 30$  と比べても約 53%少ない。従来手法において階層レベル 2 の階層化ネットワークには車線数が 2 以上のリンクが全て含まれているが、提案手法では階層レベル 2 に含むノード数及びリンク数を決定する際に車線数に加えて各ノード及びリンクの重要性を



(a) 平均走行距離



(b) 平均コスト



(c) 平均計算時間

図 3: 従来手法と提案手法の平均走行距離, 平均コスト, 平均計算時間比較 (5km 未満)

Fig. 3 Comparison of average travel distance, average cost, and average computation time between conventional and proposed methods (less than 5km).

考えた上で決定している。重要性の高いノード及びリンクを上位階層のネットワークに含め、車線数が大きくても重要性の低いリンクは含めないことにより、従来手法よりもノード数及びリンク数が少なくなっている。同時に、近似最短経路の探索の過程において上位階層のネットワークに含まれるノードに到達すれば大幅に経路探索の計算時間が削減されることから、今回のような結果が得られたと考えられる。

階層化に関して、本実験では取り扱えなかったが今後検討すべき項目が存在する。一つが、階層レベルである。本

論文では、従来手法と同様に全てのエージェントに対して最大階層レベルを3で固定していた。しかし、これが最適な階層レベルであるかの検証は行っていない。また、階層化に関する論文の中には階層レベルを道路ネットワークやエージェントに合わせて可変にする手法も存在している。階層レベルは階層化手法の性能を左右する重要な要素の一つであるため、階層レベルを固定にするか可変にするか、また最大階層レベルをどのように設定するかは今後検討が必要である。

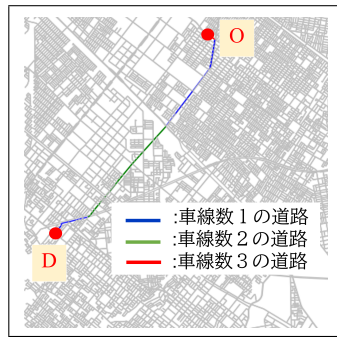
もう一つが、動的な属性による階層化である。本論文では、階層化を行う際の属性として車線数を使用している。これは、時間経過に関わらず不変の静的な属性である。階層化を用いた経路探索において、上位のネットワークへの移動後は下位のネットワークには移動しないことが一般的である。しかし、階層化を行う際に交通状況のような動的な属性を含まない場合、上位のネットワークにおいて混雑や事故が発生するケースの時に、階層化を用いることにより結果が悪化する場合がある。対応策として、一時的に下位のネットワークへの移動を許容する方法も考えられるが、階層化を行う際に動的な属性を含めることで、このような例外的な状況に対する追加の処理を行う必要がなくなる。一方で、動的な属性による階層化を行う場合、時間経過により階層化ネットワークの再構築の必要性が出てくる可能性もある。このように動的な属性による階層化は有効な方法であると考えられる反面、検討すべき項目も存在する。今後は静的な属性による階層化と動的な属性による階層化のそれぞれの利点と欠点、そして有効な条件設定などに関する検証を行っていく。

## 5. 結論

本論文では、灯油配送計画の最適化に向けた既存の道路ネットワーク階層化手法の検証と改良手法の提案を行った。札幌駅周辺の道路ネットワークに対して従来手法及び提案手法を用いた近似最短経路探索を適用し、A\*アルゴリズムによる厳密な最短経路の探索と比較したところ、異なる度合いの細街路への忌避を持つ複数種類のエージェントに対して、経路探索の計算時間、及び求められた経路のコストにおいて従来手法を上回る性能を示した。加えて、従来手法において最短経路に対して著しくコストの大きい経路が求められるODペアに対して、提案手法は最短経路とほぼ同等の経路を求める例を示した。

今後の課題として、灯油配送計画での利用における近似最短経路の評価基準を確立し、道路ネットワークの階層化手法を用いた灯油配送計画の決定方法を実装することが挙げられる。

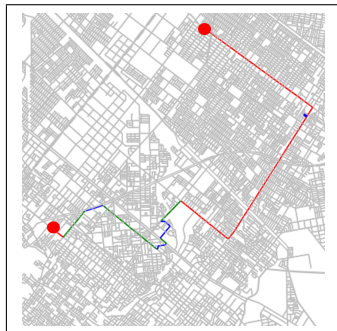




(a) Optimal shortest path



(b) Conventional method ( $H_{max} = 30$ )



(c) Conventional method ( $H_{max} = 100$ )



(d) Proposed method

図 4: 各手法の階層化ネットワークにより  $A_4$  に対して探索された近似最短経路の例

Fig. 4 Examples of approximate shortest paths for  $A_4$  obtained by the hierarchical network of each method

#### 参考文献

- [1] 大江弘峻, 横山想一郎, 山下倫央, 川村秀憲, 多田満朗: タブーサーチを用いた灯油配送計画の最適化, 研究報告 知能システム (ICS), No. 15, pp. 1-8 (2022).
- [2] Dijkstra, E.: A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, *Numerische Mathematik*, Vol. 269, p. 271 (1959).
- [3] Jagadeesh, G. R., Srikanthan, T. and Quek, K.: Heuristic techniques for accelerating hierarchical routing on road networks, *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 301-309 (2002).
- [4] 福田隼馬, 阿部和規, 藤井秀樹, 山田知典, 吉村忍ほか: 大規模マルチエージェント交通流シミュレーションのための階層的経路探索手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 59, No. 7, pp. 1435-1444 (2018).
- [5] 中村俊之, 吉井稔雄, 北村隆一: 全ての道路リンクに相当する単純化ネットワーク作成手法の構築, 土木計画学研究・論文集, Vol. 23, pp. 441-446 (2006).
- [6] 中村俊之, 吉井稔雄, 北村隆一: 単純化ネットワークを用いた経路選択モデルの構築と適用, 土木学会年次学術講演会公演概要集 4 部, Vol. 60, pp. 71-72 (2005).
- [7] Song, Q. and Wang, X.: Efficient Routing on Large Road Networks Using Hierarchical Communities, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 132-140 (online), DOI: 10.1109/TITS.2010.2072503 (2011).
- [8] Nejad, M. M., Mashayekhy, L. and Chinnam, R. B.: Effects of traffic network dynamics on hierarchical community-based representations of large road networks, *2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, pp. 1900-1905 (2012).
- [9] Mensah, D. N. A., Gao, H. and Yang, L. W.: Approximation Algorithm for Shortest Path in Large Social Networks, *Algorithms*, Vol. 13, No. 2 (online), DOI: 10.3390/a13020036 (2020).
- [10] Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R. and Lefebvre, E.: Fast unfolding of communities in large networks, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, Vol. 2008, No. 10, p. 10008 (2008).
- [11] Foundation, O.: OpenStreetMap, OpenStreetMap Foundation (online), available from (<https://www.openstreetmap.org>) (accessed 2022-09-07).