

自動走行物流システムでの複合一貫輸送のための 交通流の容量制約を考慮した 拠点配置と料金設計

瀬尾亨¹・河瀬理貴²

¹正会員 東京科学大学環境・社会理工学院准教授 土木・環境工学系（〒152-8552 東京都目黒区大岡山
2-12-1-W6-10）

E-mail: seo.t.aa@m.titech.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 東京科学大学環境・社会理工学院助教 土木・環境工学系

近年、高速道路などの限定領域での自動走行物流システムが着目されている。このようなシステムは、高速道路上の長距離輸送を無人で効率的に行えるが、目的地へのラストマイル輸送のためには通常のトラック等に貨物を載せ替える必要がある。そのため、高速道路沿いに一般道との接続ハブとなる物流拠点を設ける必要があり、その最適な位置、規模、価格体系の決定のための方法が望まれる。本研究では、動的に変化する交通流の容量制約などの状況を考慮したうえで、最適な拠点の位置と規模を決定する線形計画問題を提案する。さらに、その最適化問題の双対問題に基づき、システム最適を実現するための拠点の利用料金を決定する手法も提案する。

Key Words: Automated vehicles, Logistics, Traffic flow, Network design, Pricing

1. はじめに

自動走行物流システムとは、道路上の貨物輸送のために自動走行車両を用いる物流システムである。自動走行車両は長距離輸送の運行費用を大幅に削減し、既存の長距離輸送手段と比べて効率的であると予想され^{1),2)}、特に日本では労働力不足などの解決策として注目されている。

完全自動走行車両が一般道を含む全ての領域を走行可能になるには未だ長い時間を要すると想定される。そこで、高速道路などの限定領域のみを走行する自動走行車両と、一般道を走行する手動運転の有人車両を組み合わせて複合一貫輸送を行う物流システムが提案されている³⁾。これは、高速道路に自動走行専用車線を設置し、その上の無人自動走行車両により貨物を長距離輸送して効率的な物流を実現しようとするものである。例えば日本では、東名高速道路などの都市間高速道路沿いに物流専用道路を設けて小口・多頻度輸送を行い、さらに輸送と保管を統合し需要を平準化して効率的な物流を実現する「自動物流道路」が構想されている⁴⁾。以降本論文では、「自動走行物流システム」という用語は特記しない限りそのようなシステムを指すものとする。

自動走行物流システムの運用には、高速道路と一般道の間で貨物を積み替える拠点が必要である。そのよ

うな拠点では、高速道路を移動してきた自動走行車両から貨物を降ろし、倉庫に一時的に貯留し、一般道へ向かう有人車両に載せるという作業が行われる。そのため自動走行物流システムを計画する際には、拠点の位置、貨物の最大積み替え量（フロー容量）、貨物の最大貯留量（ストック容量）を社会にとって最適になるように設計する必要がある。

拠点設計の際には自動走行物流システムが交通流に与える影響も考慮する必要がある。高速道路および一般道には物流ではない一般の交通流も多く流れている。一般交通には、通勤・帰宅時間帯に多くなるという時間的偏りや、都市部ほど多くなるという空間的偏りが存在する。道路の交通容量は限られており、物流交通と一般交通の和が容量を超えない状態とするのが望ましい。一般交通の量を制御するのは一般に難しいため、物流交通は一般交通の時空間的偏りを避けるように交通容量を効率的に使うように配分する必要がある。

さらに、輸送業者や荷受人が営利目的で行動する主体の場合、社会最適になるように設計した拠点は必ずしも適切に利用されるとは限らない。そのため、課金やインセンティブなどの手法により彼らの行動が社会にとっても望ましくなるようにする必要がある。具体的には、物流拠点や道路の利用料金が場所と時間によって異なるように設計するという手段が考えられる。前

述の一般交通との偏りを避ける必要性を考えると、時間帯別の動的課金が特に有用な可能性がある。

本研究の目的は、自動走行物流システムを、交通流の時空間的に偏った容量制約を考慮したうえで最適に設計する方法の構築である。提案方法は、まず、複合一貫輸送の一般的な問題である複数モード間の摩擦を最小化するための施設配置、在庫管理、輸送スケジュール、料金の決定問題を解くものである。さらにそれに加えて、自動走行物流システムの特徴である拠点配置により渋滞パターンが変化し最適な輸送スケジュールや料金が動的に変化する点を考慮したことが、対象システムおよび方法論の新規性といえる。基礎となる方法論には著者らがこれまでに開発した共有型自動運転システムの最適化手法⁵⁾を用い、それに自動走行物流システムの要素を組み込んだ手法を提案する。

2. 文献レビュー

本章では、既存の複合一貫輸送の最適化研究を整理し、自動走行物流システムの拠点配置と料金設計問題の位置付けを示す。複合一貫輸送の研究は 2000 年代初頭より急速に進展し、多くのレビュー論文^{6),7),8)}が発表されている。鉄道・船舶・航空の長距離輸送と貨物自動車のラストマイル輸送による複合一貫輸送が注目を集める⁸⁾一方、無人の自動走行車両と有人車両との複合一貫輸送の最適化研究は、著者らの知る限りない。

異なる輸送手段を円滑に接続するには、複合一貫輸送のネットワーク設計が重要である⁸⁾。ネットワーク設計問題は、輸送手段間での貨物の積替えや在庫保管を担う物流拠点の配置や規模、輸送リンクの容量を決定する。鉄道、船舶、航空による複合一貫輸送ネットワーク設計の先駆的研究として、それぞれ Arnold et al.^{9),10)}、Shintani et al.¹¹⁾、Barnhart and Schneur¹²⁾が挙げられる。基本的な問題は、物流拠点間の輸送量を表す連続変数と拠点やリンクの設置を表すバイナリ変数を最適化する混合整数計画問題として定式化され、多期間^{13),14)}、確率計画^{15),16)}、多目的最適化^{17),18)}を含む問題へと進展している。ただし上記の研究は、単一の意味決定者を前提としており、輸送業者の(利己的な)経路や交通手段の選択行動を捨象している。

輸送業者の選択行動を考慮したネットワーク設計は、旅客交通の古典的な道路ネットワーク設計¹⁹⁾の拡張に位置付けられる。Loureiro and Balston²⁰⁾は、確率的利用者均衡配分を下位問題、ネットワーク設計を上位問題とする 2 レベル計画問題を提案した。その後、下位問題はマルチクラス利用者均衡^{21),22)}やサプライチェーンネットワーク均衡²³⁾へ拡張され、陸上と海上の複合一貫輸送の設計²⁴⁾にも適用されている。また Wang and

Meng²⁵⁾や Teye et al.^{26),27)}は、ランダム効用最大化に基づく輸送業者の選択行動の下で、複合一貫輸送のネットワーク設計問題を 1 レベルの数計計画問題で定式化した。しかし、輸送業者の利己的な選択行動がもたらす負の外部性(混雑)により、最適な物流システムは一般に実現し得ない。旅客交通の文脈では、混雑課金が負の外部性を解消する一般的な手法として認識されている²⁸⁾。

複合一貫輸送のネットワーク設計と料金設計の同時最適化に関する研究は多岐に渡るが、その大半は企業の利潤最大化を主眼とする研究^{29),30),31)}であり、負の外部性の解消に資する研究は限られる。さらに後者の研究の中でも、環境への外部性(e.g., 大気汚染)を緩和する料金設計^{32),33),34)}が中心であり、混雑現象やその料金設計(i.e., 混雑課金)を扱う複合一貫輸送研究は希少である。Santos et al.³⁵⁾や Taheri and Tamannaer³⁶⁾は、外部費用³⁷⁾を含む総輸送費用を最小化する複合一貫輸送のネットワーク設計を分析し、外部性の内部化が最適設計に決定的な影響を及ぼすことを指摘した。Yang et al.³⁸⁾は、静的利用者均衡に基づく輸送業者の経路選択行動の下で、陸上と海上の複合一貫輸送のネットワーク設計やリンク混雑料金を決定する 2 レベル計画問題を提案した。

動的料金設計は、複合一貫輸送の先行研究にて見落とされてきた意思決定の一つである。自動走行物流システムは、鉄道等の輸送手段に比べて柔軟な貨物輸送を可能にする一方、時々刻々変動する交通状況に応じた動的な運用を必要とする³⁹⁾。従って、複合一貫輸送のネットワーク設計と静的料金設計の先行研究を、自動走行物流システムの設計に適用するのは適切でない。

旅客交通の文脈では、道路の動的混雑課金が社会最適なシステムを実現する有用な手法として長年注目されてきた²⁸⁾。しかし、貨物交通への道路混雑課金の適用には、理論と実証の両面から限界が指摘されている^{40),41)}。これは貨物交通が商品受注の派生需要であること、そして道路の混雑課金が輸送サービスの利用者である荷受人の行動変容を促すメカニズムを欠いていることに起因する。Holguín-Veras and Aros-Vera⁴²⁾と Holguín-Veras and Sánchez-Díaz⁴³⁾は、ミクロシミュレーションを用いて、荷受人への料金設計の効果を評価した。彼らは、荷受人と輸送業者への料金設計を組み合わせることで、少額の通行料金のみで貨物自動車の時間的シフトを促し、道路混雑を効果的に削減できることを示した。

本研究で提案する枠組みは、近い将来に実現し得る自動走行物流システムでの複合一貫輸送に対して、

- 自動走行車両と有人車両を接続する物流拠点の配置と規模、
- 混雑課金や拠点利用料金を含む、輸送車両と輸送

サービス利用者（荷受人）への動的料金設計

を同時に決定するという点で新しい。輸送車両への動的混雑課金と輸送サービス利用者への利用料金を導出する研究は、急速に進展しているが、貨物輸送を対象とする研究は武田・赤松⁴⁴⁾、ネットワーク設計を同時に扱う研究は Seo et al.⁵⁾ および同著者らの先行研究^{45),46)}に限られる。武田・赤松⁴⁴⁾は交通・物流を統合したモビリティ・サービスの最適な価格体系を導く Day-to-Day メカニズムを構築した。ただし、効率的な複合一貫輸送に不可欠な物流拠点の配置問題を考慮していない。Seo et al.⁵⁾は、共有型自動運転システムの最適な価格体系を解析し、ネットワーク設計に伴う費用が共有型自動運転車両への動的混雑課金の合計より小さいか、せいぜい等しいことを証明した。本研究は、Seo et al.⁵⁾の枠組みを、限定領域のみを走行可能な自動運転車両と一般道を走行可能な有人車両を考慮したうえで、物流拠点のストック（在庫）とフロー（積替え）の容量設計を組み込み、自動走行物流システムに拡張するものである。

3. 手法

(1) 基本設定

本研究の基本的な問題設定を述べる。本研究では、郊外から都心に向けて貨物を輸送する状況を考える。そして、道路ネットワークおよび物流需要を所与としたときに、その需要を最も効率的に捌ける自動物流システムの形態を決定する手法を構築する。ここで、「最も効率的」とは、社会全体でかかる総コストが最小であるという意味である。一方、実際の物流システムでは通常の場合、輸送業者や荷受人は自らの利益を最大化するように行動し、その結果総コストが最小ではない状態が実現する。そこで、総コストを最小化した状態を実現するには課金などの施策が必要になる。本研究では、この課金額も同時に導出する手法を構築する。

自動物流システム設計問題の決定変数は、物流拠点の規模、自動走行及び有人の物流車両の数、それらの運行スケジュールである。このとき、道路上で物流車両が利用できる交通容量や、拠点での貨物のストック・フロー容量を制約条件として考慮する。上記の問題は最適化問題として定式化される。さらに、その最適性条件と双対問題に基づき、車両と貨物がそれぞれ自己利益を最大化するべく合理的に行動するとしたときに、最適状態を達成するために課すべき料金を求める。

道路ネットワークの主要要素は以下の通り。道路ネットワークはリンクとノードからなるグラフとしてモデル化する。リンクは路線であり、以下の 3 種類に分類される。一つ目は自動走行非限定領域（高速道路一般車

線および一般道）であり、有人車両のみが通行できる。二つ目は限定領域（高速道路自動走行専用車線）であり、自動走行車両のみが通行できる。三つ目は物流拠点での貨物の移動を表すためのリンクであり、貨物のみが移動できる。非限定領域では、物流に割り当てられる交通容量は時間と場所によって異なる。これは一般交通の量に応じて渋滞を起こさない交通量を意味する。ノードは物流拠点あるいは道路のジャンクションである。物流拠点は高速道路と一般道を貨物移動リンクで接続するもので、貨物のみが移動できる。ジャンクションは各種の道路同士の交点であり、ランプや交差点である。上記の道路ネットワークの模式図を図-1 に示す。本研究で考えるモデルは本来は一般の道路ネットワークを扱えるが、以降では議論を単純にするために図-1 のように郊外から都心に高速道路と一般道が一本ずつ並行して整備されている状況を考える。

物流拠点は 1 ノードと 2 リンクからなる。ノードは貨物を一時的に貯留しておく場を意味し、有限のストック容量を持つ。リンクは貨物の積み替えを意味し、そのフロー容量は時間当たり積み替え量を意味する。

ネットワーク内を移動する主体は 3 種類ある。一つ目は有人車両、二つ目は自動走行車両である。それぞれの車両はネットワークのうちそれぞれが走行可能な領域を移動可能であり、ネットワーク内を自由に走り回り貨物を複数回輸送できる。そして、ネットワーク中を初期時刻に任意のノードから出発し最終時刻に任意のノードに到着するように走行するとする（途中の時刻に発生・消失はしない）。三つ目は貨物であり、道路リンク上は有人車両あるいは自動走行車両に搭載されたときのみ移動可能であり、物流拠点リンクではその積み替え性能に応じて移動可能である。貨物は出発地、目的地、目的地への希望到着時刻、目的地への最遅到着時刻を持つ。貨物の需要は所与かつ既知とする。図-2 に物流拠点周辺の車両と貨物の動きの模式図を示す。

本研究では、移動体の流量が時間とともに変化する動的な交通現象を考える。そのために、時間拡張ネットワークの概念を用いる。これは図-3 に示すように、通常の空間的なネットワークを、一定の時間間隔（タイムステップ幅）毎に重ねたものである。これにより、あるタイムステップに空間的に移動する主体は斜めのリンクを移動し、あるタイムステップにノードで待機する主体は垂直のリンクを移動するという形で表現できる。本問題が考える総時間長やタイムステップ幅は基本的に任意であるが、例えば、ある一日の現象を 30 分～1 時間程度のタイムステップ幅でモデル化するという規模が扱いやすいと思われる。

時空間ネットワークにおけるリンク ij は $i \neq j$ のときに空間的に移動する通常の意味での「リンク」であ

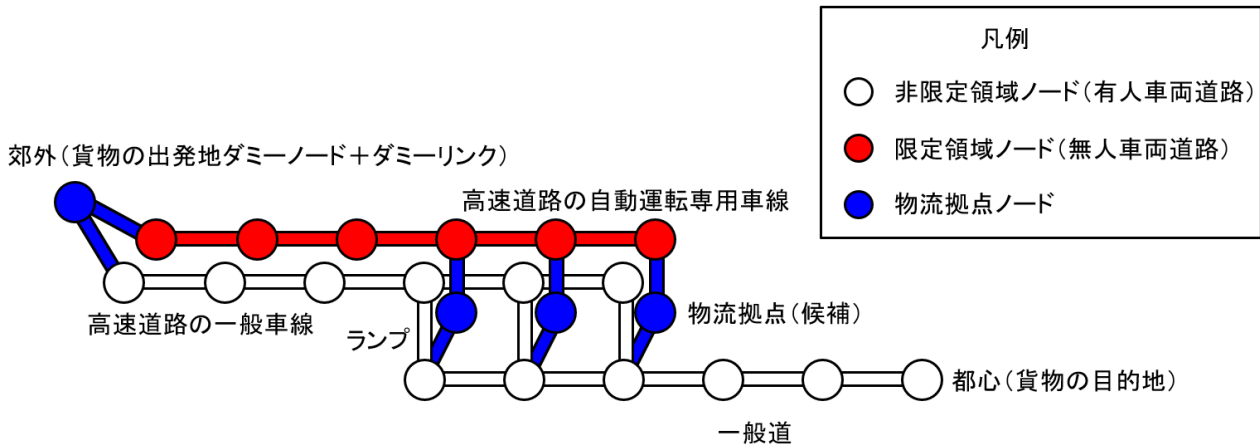


図-1: 道路ネットワークの模式図

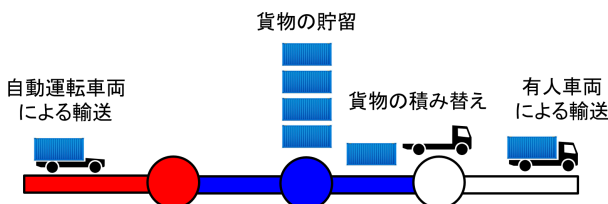


図-2: 物流拠点の模式図

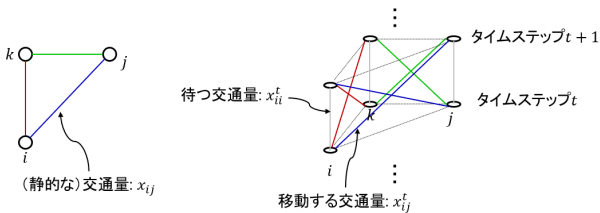


図-3: 時間拡張ネットワーク

り、 $i = j$ のときは空間的には移動せずノード i に待機する事象を意味するリンクとなる。そのため、 $i = j$ のとき「リンク ij を移動する」という表現は物理的な意味としてはわかりにくく、「ノード i に待機する」というとよりわかりやすい。しかし、数学的には両者ともに時空間ネットワークのある時刻のリンク ij を移動することに変わりはない。そして、 $i \neq j$ か否かによって「移動」と「待機」という用語を使い分けると表現が冗長になり、さらに数学的解析も非常に煩雑になるので、以降では特別な必要がない限り $i \neq j$ か否かに関わらず「リンク ij を移動する」と表現することとする。

(2) システム最適問題の定式化

以上の考え方にに基づき、総コストを最小化する自動走行物流システムの形態を決定する問題を定式化する。

a) 決定変数

本手法の主な決定変数は以下の通り：

x_{ij}^t 時刻 t のリンク ij の有人車両移動台数

y_{ij}^t 時刻 t のリンク ij の自動走行車両移動台数

$z_{rs,ij}^{k,l,t}$ 時刻 t のリンク ij の、出発地 r 、目的地 s 、希望到着時刻 k 、最遅到着時刻 l の貨物移動数

γ_{ij} $i \neq j$ のとき、物流拠点リンク ij の、時間当たりの最大貨物積み替え単位数。 $i = j$ のとき、物流拠点ノード i の、最大貨物貯留容量。

N 有人車両の総台数

M 自動走行車両の総台数

これ以外にも、これらの変数が定まれば自動的に定まる副次的な決定変数がいくつかあるが、それらは後述する。

本手法では、車両と貨物はともに移動量を連続変数としてモデル化する。実際の車両と貨物は離散的な存在であり、厳密にモデル化するのであればそれらの離散的な軌跡を考える必要がある。しかし、そのような離散的なアプローチでは、大規模問題を考えると離散変数の数が膨大になり現実的に求解不可能になってしまう。そこで本手法では、それらの移動量を連続的に考える近似・緩和を導入し、大規模問題でも比較的容易に求解できるようにする。その結果得られる解は、離散的な扱いをしたときよりも一般に効率の良い解となる点は注意が必要である。しかし、それは伝統的な交通量配分などと同様の問題であり、移動体の粒子性が重要とならないような大規模な交通計画上は大きな問題ではないと考えられる。

モデル式上は物流拠点の位置と数はあらかじめ定まっているように定式化されるが、仮にある位置の物流拠点の規模を表す変数 γ_{ij} がゼロとなった場合、その位置

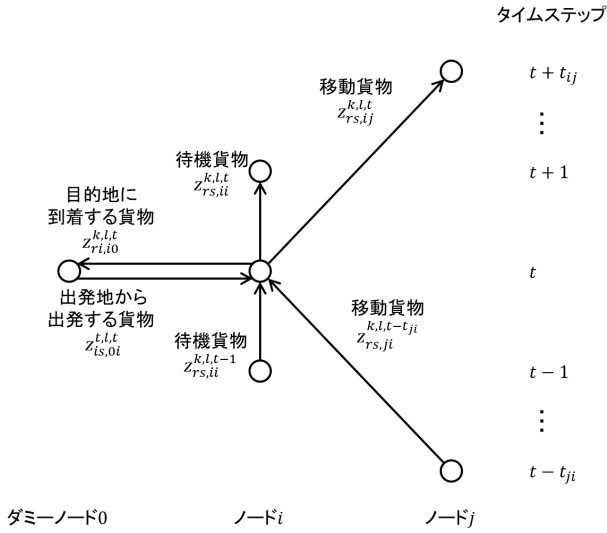


図-4: 時刻 t のノード i の周りの貨物の移動量

には物流拠点を実質的に存在しないという意味になる。そのため、本問題は物流拠点の位置決定問題も含んでいるといえる。

b) 制約条件

上記の決定変数は、物流・交通システムの性質に応じた制約を受ける。考慮する制約は以下の通り：

- ・車両・貨物のノード保存則（後述式 (1h)–(1j)）
- ・非限定領域での貨物の移動量は、そこをその時間に走行する有人車両の積載可能量以下（同式 (1k)）
- ・限定領域での貨物の移動量は、そこをその時間に走行する自動走行車両の積載可能量以下（同式 (1l)）
- ・物流拠点での貨物の移動量・貯留量は対応する制限量以下（同式 (1m)）
- ・車両交通量は交通容量以下（同式 (1n), (1o)）
- ・全ての貨物は指定された出発地からその出発時刻以降に出発する（同式 (1p)）
- ・全ての貨物は指定された目的地にその最遅到着時刻以前に到着する（同式 (1q)）
- ・物流拠点の規模は所与の最大値の以下（同式 (1r)）
- ・非負制約（同式 (1s)–(1u)）

時間拡張ネットワーク中の、貨物のノードでの保存則の模式図を図-4に示す。ここで、ノード0は出発・到着交通を簡便に表すためのダミーノードである。例えば、式 (1p) の $z_{is,0i}^{k,l,t}$ はリンク $0i$ を移動する貨物の量であるが、これは実質的にはノード i から出発する貨物を意味する。本モデルは図-4のように、拠点で待機する（貯留される）貨物、拠点に運び込まれる貨物、拠点から運び出される貨物、拠点が出発地・目的地である貨物の流れを表現する。有人車両と自動走行車両も同様にモデル化している。

c) コストと目的関数

本問題の目的関数はシステム全体でかかる総コストである。これは、以下の各コストの重み付き和として表現する：

- N 有人車両の総台数（後述式 (1d) で定まる）
- M 自動走行車両の総台数（後述式 (1e) で定まる）
- X 有人車両の運用にかかるコスト（後述式 (1b) で定まる副次的な決定変数）。これは有人車両の総移動距離と総運用時間の重み付き和。
- Y 自動走行車両の運用にかかるコスト（同式 (1c)）。これは自動走行車両の総移動距離に応じて線形に定まるとする。
- G 貨物がある希望到着時刻よりも違う時刻に到着するコスト（同式 (1g)）。時刻差とコストの関係は所与とする。
- C 拠点整備にかかるコスト（同式 (1f)）。これは γ の値に応じて線形に定まるとする。

有人車両と自動走行車両の違いは走行可能な領域だけではなく、有人車両のみ人件費を考慮して運用時間に対してもコストが発生するようにモデル化して表現している。

貨物は目的地に最遅到着時刻以前に到着する必要がある、かつ希望到着時刻と実際の到着時刻に乖離があるとコストが発生するというモデルとしている。希望到着時刻に関するコストは、変数 $g^{k,t}$ を希望到着時刻 k の貨物が時刻 t に到着することによりかかるコストとしてモデル化する。この最遅到着時刻、希望到着時刻、希望到着時刻とのズレのコストを適切に設定すれば、貨物の速達や時間指定配送のような要素もモデル化できる。

実際のシステムでは、これらのコストが発生するタイミングや、コストを考慮する時間スケールは全く異なる。例えば、車両の運用コストは毎日あるいは時々刻々の運用に応じて生じるが、拠点整備のコストは整備時にまとめてかかる。本問題では、前述したように1日の車両・貨物の移動パターンを求めるような形が想定されるが、この場合拠点整備コストはその1日の償還や減価償却の額とみなせば、時間的に整合的なモデル化が可能である。本問題は特定の1日の運行スケジュールや料金を詳細に決定するためのものではなく、物流システムの計画時に基本的な運行スケジュールや料金を内生的に考慮し、より適切な拠点設計などを可能とするためのものである。

d) 最適化問題

以上をまとめ、本研究が提案する手法は以下の最適化問題 [DSO-AVLS] (DSO は Dynamic System Optimum,

AVLS は Automated Vehicle Logistics System のそれぞれ略) として定式化される:

$$\min \alpha_X X + \alpha_Y Y + \alpha_N N + \alpha_M M + \alpha_C C + \alpha_G G \quad (1a)$$

subject to

$$X = \sum_{ij,t} (t_{ij} + \alpha_{dx} d_{ij}) x_{ij}^t \quad (1b)$$

$$Y = \sum_{ij,t} d_{ij} y_{ij}^t \quad (1c)$$

$$N = \sum_i x_{0i}^0 \quad (1d)$$

$$M = \sum_i y_{0i}^0 \quad (1e)$$

$$C = \sum_{ij} c_{ij} \gamma_{ij} \quad (1f)$$

$$G = \sum_{r,s,k,l,t} g^{k,t} z_{rs,s0}^{k,l,t} \quad (1g)$$

$$\sum_j x_{ji}^{t-t_{ji}} - \sum_j x_{ij}^t = 0 \quad \forall t, i \quad (1h)$$

$$\sum_j y_{ji}^{t-t_{ji}} - \sum_j y_{ij}^t = 0 \quad \forall t, i \quad (1i)$$

$$\sum_j z_{rs,ji}^{k,l,t-t_{ji}} - \sum_j z_{rs,ij}^{k,l,t} + z_{is,0i}^{k,l,t} - z_{ri,i0}^{k,l,t} = 0 \quad \forall i, t, r, s, k, l \quad (1j)$$

$$\sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t} \leq \rho_x x_{ij}^t \quad \forall t, ij \in \mathcal{L}_{\text{nonODD}} \quad (1k)$$

$$\sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t} \leq \rho_y y_{ij}^t \quad \forall t, ij \in \mathcal{L}_{\text{ODD}} \quad (1l)$$

$$\sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t} \leq \gamma_{ij} \quad \forall t, ij \in \mathcal{L}_{\log} \quad (1m)$$

$$x_{ij}^t \leq \mu_{x,ij}^t \quad \forall t, ij \in \mathcal{L}_{\text{nonODD}} \quad (1n)$$

$$y_{ij}^t \leq \mu_{y,ij}^t \quad \forall t, ij \in \mathcal{L}_{\text{ODD}} \quad (1o)$$

$$\sum_t z_{rs,0r}^{k,l,t} = f_{rs}^{k,l} \quad \forall r, s, k, l \quad (1p)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}_i} z_{rs,s0}^{k,l,t} = f_{rs}^{k,l} \quad \forall r, s, k, l \quad (1q)$$

$$0 \leq \gamma_{ij} \leq \gamma_{ij}^{\max} \quad \forall ij \quad (1r)$$

$$z_{rs,ij}^{k,l,t} \geq 0 \quad \forall t, ij, rs, k, l \quad (1s)$$

$$x_{ij}^t \geq 0 \quad \forall t, ij \quad (1t)$$

$$y_{ij}^t \geq 0 \quad \forall t, ij \quad (1u)$$

ここで、これまでに定義していない変数の意味は以下の通り:

- t_{ij} リンク ij の移動時間
- d_{ij} リンク ij の長さ
- ρ_x 有人車両一台当たりの最大貨物積載量
- ρ_y 自動走行車両一台当たりの最大貨物積載量

$\mu_{x,ij}^t, \mu_{y,ij}^t$ $i \neq j$ のとき、時刻 t のリンク ij の物流車両 (x : 有人, y : 自動走行) が利用可能な交通容量. $i = j$ のとき、時刻 t のノード i の物流車両が利用可能な車両待機容量.

$\alpha_X, \alpha_Y, \alpha_N, \alpha_M, \alpha_C, \alpha_G$ 総コストを考える際の添字の要素の重み係数

α_{dx} 有人車両の運行コストのうち、走行距離コストの係数

$f_{rs}^{k,l}$ 出発地 r , 目的地 s , 希望到着時刻 k , 最遅到着時刻 l の貨物の総需要

c_{ij} 物流拠点リンク ij の容量拡張に要する単位当たりコスト

$\gamma_{ij}^{\max}$ γ_{ij} の取りうる最大値

$\mathcal{L}_{\text{ODD}}$ 限定領域リンク集合

$\mathcal{L}_{\text{nonODD}}$ 非限定領域リンク集合

$\mathcal{L}_{\log}$ 物流拠点リンク集合

$\mathcal{T}_l$ 最遅到着時刻 l の貨物が移動可能な時刻集合

$t_{\max}$ 最終時刻

本問題は線形計画問題であるため、問題の規模が大きくとも効率的に解ける。しかし、連続変数を用いたモデル化に起因する弱点がいくつかある。一つは、前述した連続緩和自体の問題である。もう一つは、どの車両がどの貨物を運ぶかを識別していないため、車両が道路を走行している最中に貨物を積み替えると解釈される現象が生じうる点である。この問題は、ネットワーク形状を工夫すればある程度は防止できる。例えば、図-2 のネットワーク形状を用いれば、有人車両と自動走行車両の間での積み替えは生じず、必ず物流拠点を經由して積み替えることが保証される。一方で、有人車両が高速道路を走行中に貨物を別の有人車両に積み替えることは生じうる。これは、高速道路のリンクとノードを上下線で完全に分離すれば（図-2 では煩雑になるので表現していない）少なくとも上下線間で積み替える極度に非現実的なことは防げるが、あらゆる場所で積み替えを完全に防止するのは困難である。これは本方法論の原理的な限界であり、その適用対象はこの限界が結果に重大な影響を及ぼさないように選択する、あるいはモデル化するのが望ましい（例：貨物の OD が限られていれば、道路上で貨物を積み替えるメリットが少ないのでこの限界は表面化しづらい）。

(3) 利用者均衡状態での最適課金の分析

[DSO-AVLS] はシステム最適問題であり、貨物（荷受人）や車両（輸送業者）は自己の利益は考慮せずに行動するという原則に基づいていた。しかし、赤松⁴⁷⁾ およびそれを発展させた研究^{45), 46), 5)} のアプローチにより

[DSO-AVLS] の最適性条件を解析すると、貨物と車両が自己利益を合理的に最大化しようとする利用者均衡状態の下で、[DSO-AVLS] の解であるシステム最適状態を実現するための課金方策を分析できる。さらに最適課金の具体的な値を求めるだけでなく、それが満たす理論的性質も導出できる。本節でそれらについて詳述する。なお、用いる方法は形式的には丸山・瀬尾⁴⁶⁾、Seo et al.⁵⁾ の単純な拡張であり、詳細についてはそちらも参照されたい。

a) 利用者均衡状態と最適課金の導出

まず、[DSO-AVLS] の Karuth–Khun–Tucker (KKT) 条件 [KKT-DSO-AVLS] を求める。元の問題にも含まれる式（等式制約）および非負条件を除くと、KKT 条件は以下となる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_i^t - \phi_j^{t+t_{ij}} \\ = \alpha_X(t_{ij} + \alpha_{dx}d_{ij}) \\ - \rho_x p_{x,ij}^t + q_{x,ij}^t \quad \text{if } x_{ij}^t > 0 \\ \phi_i^t - \phi_j^{t+t_{ij}} \\ \leq \alpha_X(t_{ij} + \alpha_{dx}d_{ij}) \\ - \rho_x p_{x,ij}^t + q_{x,ij}^t \quad \text{if } x_{ij}^t = 0 \end{array} \right. \quad \forall ij, t \quad (2a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_i^t - \psi_j^{t+t_{ij}} \\ = \alpha_Y d_{ij} - \rho_y p_{y,ij}^t \\ + q_{y,ij}^t \quad \text{if } y_{ij}^t > 0 \\ \psi_i^t - \psi_j^{t+t_{ij}} \\ \leq \alpha_Y d_{ij} - \rho_y p_{y,ij}^t \\ + q_{y,ij}^t \quad \text{if } y_{ij}^t = 0 \end{array} \right. \quad \forall ij, t \quad (2b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_{rs,i}^{k,l,t} - \pi_{rs,j}^{k,l,t+t_{ij}} \\ = p_{x,ij}^t + p_{y,ij}^t \\ + p_{\gamma,ij}^t \quad \text{if } z_{rs,ij}^{k,l,t} > 0 \\ \pi_{rs,i}^{k,l,t} - \pi_{rs,j}^{k,l,t+t_{ij}} \\ \leq p_{x,ij}^t + p_{y,ij}^t \\ + p_{\gamma,ij}^t \quad \text{if } z_{rs,ij}^{k,l,t} = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, ij, rs, k, l \quad (2c)$$

$$- \sum_t p_{\gamma,ij}^t - \theta_{ij} + \hat{\theta}_{ij} + \alpha_C c_{ij} = 0 \quad \forall ij \quad (2d)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\phi_i^0 = \alpha_N \quad \text{if } x_{0i}^0 > 0 \\ -\phi_i^0 \leq \alpha_N \quad \text{if } x_{0i}^0 = 0 \end{array} \right. \quad \forall i \quad (2e)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\psi_i^0 = \alpha_M \quad \text{if } y_{0i}^0 > 0 \\ -\psi_i^0 \leq \alpha_M \quad \text{if } y_{0i}^0 = 0 \end{array} \right. \quad \forall i \quad (2f)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\pi_{rs,r}^{k,l,t} = \eta_{s,r}^{k,l} \quad \text{if } z_{rs,0r}^{k,l,t} > 0 \\ -\pi_{rs,r}^{k,l,t} \leq \eta_{s,r}^{k,l} \quad \text{if } z_{rs,0r}^{k,l,t} = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, rs, k, l \quad (2g)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda_{rs}^{k,l} = g^{k,t} - \pi_{rs,s}^{k,l,t} \quad \text{if } z_{rs,s0}^{k,l,t} > 0 \\ -\lambda_{rs}^{k,l} \leq g^{k,t} - \pi_{rs,s}^{k,l,t} \quad \text{if } z_{rs,s0}^{k,l,t} = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, rs, k, l \quad (2h)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t} = \rho_x x_{ij}^t \quad \text{if } p_{x,ij}^t > 0 \\ \sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t} \leq \rho_x x_{ij}^t \quad \text{if } p_{x,ij}^t = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, ij \quad (2i)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t} = \rho_y y_{ij}^t \quad \text{if } p_{y,ij}^t > 0 \\ \sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t} \leq \rho_y y_{ij}^t \quad \text{if } p_{y,ij}^t = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, ij \quad (2j)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t} = \gamma_{ij}^t \quad \text{if } p_{\gamma,ij}^t > 0 \\ \sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t} \leq \gamma_{ij}^t \quad \text{if } p_{\gamma,ij}^t = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, ij \quad (2k)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{ij}^t = \mu_{x,ij}^t \quad \text{if } q_{x,ij}^t > 0 \\ x_{ij}^t \leq \mu_{x,ij}^t \quad \text{if } q_{x,ij}^t = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, ij \quad (2l)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{ij}^t = \mu_{y,ij}^t \quad \text{if } q_{y,ij}^t > 0 \\ y_{ij}^t \leq \mu_{y,ij}^t \quad \text{if } q_{y,ij}^t = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, ij \quad (2m)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{ij} = \gamma_{ij}^{\max} \quad \text{if } \theta_{ij} > 0 \\ \gamma_{ij} \leq \gamma_{ij}^{\max} \quad \text{if } \theta_{ij} = 0 \end{array} \right. \quad \forall ij \quad (2n)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = \gamma_{ij} \quad \text{if } \hat{\theta}_{ij} > 0 \\ 0 \leq \gamma_{ij} \quad \text{if } \hat{\theta}_{ij} = 0 \end{array} \right. \quad \forall ij \quad (2o)$$

ここに、新たに追加された変数は全て [DSO-AVLS] の各制約条件に対応する Lagrange 乗数である。このうち、特に重要な変数は以下の通り：

ϕ_i^t x_{ij}^t のノード保存則に対する Lagrange 乗数

ψ_i^t y_{ij}^t のノード保存則に対する Lagrange 乗数

$\pi_{rs,i}^{k,l,t}$ $z_{rs,ij}^{k,l,t}$ のノード保存則に対する Lagrange 乗数

$p_{x,ij}^t$ $z_{rs,ij}^{k,l,t}$ に関する有人車両の貨物運搬制約に対する Lagrange 乗数

$p_{y,ij}^t$ $z_{rs,ij}^{k,l,t}$ に関する自動走行車両の貨物運搬制約に対する Lagrange 乗数

$p_{\gamma,ij}^t$ $z_{rs,ij}^{k,l,t}$ に関する物流拠点の貨物運搬制約に対する Lagrange 乗数

$q_{x,ij}^t$ x_{ij}^t に関する交通容量制約に対する Lagrange 乗数

$q_{y,ij}^t$ y_{ij}^t に関する交通容量制約に対する Lagrange 乗数

なお、リンク ij が有人車両用リンクだった場合、 $p_{x,ij}^t$ と $q_{x,ij}^t$ は意味を持つ一方、 $p_{y,ij}^t, p_{\gamma,ij}^t, q_{y,ij}^t$ は自動走行車両用リンクや物流拠点リンクに対応する変数のため意味を持たない。そのため、この場合は $p_{y,ij}^t, p_{\gamma,ij}^t, q_{y,ij}^t$ の値は常にゼロであると定義する。リンク ij が自動走行車両用リンクや物流拠点リンクであった場合も同様とする。これにより、数式展開や議論が一般性を失わずに容易になる。

ここで、利用者均衡状態を通常⁴⁸⁾ 通り以下で定義する：

定義 1 (Wardrop の利用者均衡原理). 利用者均衡状態では、OD ペアで利用されている経路の移動コストは全て等しい. その値は利用されていない経路の移動コストより小さいか、せいぜい等しい.

[KKT-DSO-AVLS] に基づくと、[DSO-AVLS] の解は以下のような仮定のもとで利用者均衡状態にあるといえる. すなわち、貨物や車両は移動に際し [DSO-AVLS] で定義されたそれぞれのコストを負担するとし、さらに貨物に対しては輸送モードに応じて課金 p_x, p_y, p_γ 、有人車両に対しては課金 q_x 、自動走行車両に対しては課金 q_y を課すと、それぞれの主体の利用した移動経路は他の経路のコストよりも小さいかせいぜい等しい状態になり、それらの移動経路について利用者均衡状態が成り立つ. これは具体的には後述する一連の定理として表現される.

まずは以下の準備を行う. 利用者均衡は OD ペア毎に成り立つものであるが、本モデルの有人車両と自動走行車両には固定の OD が無いため、このままでは利用者均衡を論じられない. そこで、初期時刻と最終時刻にそれぞれ全ノードとコストゼロのリンクで繋がったダミーノードを追加する. このダミーノードはノード番号は 0、時刻は -1 あるいは $t_{\max} + 1$ とする. これにより一般性を失わずに、本モデルの時空間ネットワークを 1 起点 1 終点ネットワークに変形できる. そして、有人車両と自動走行車両はこのダミー起点からダミー終点までネットワークを移動するものとみなす. この準備をした時空間ネットワークの例を図-5 に示す.

そして、各移動主体の移動コストを適切に定義すると、そのコストの下で利用者均衡状態が以下のように成り立つ.

定理 2. 有人車両が時刻 t にリンク ij を移動するリンクコストを式 (2a) に現れる項 $\alpha_X(t_{ij} + \alpha_{dx}d_{ij}) - \rho_x p_{x,ij}^t + q_{x,ij}^t$ であるとする. すると、[DSO-AVLS] の解の有人車両のフロー x_{ij}^t は利用者均衡状態を満たす.

証明. まず、式 (2a) と、最小コスト流問題としての最短経路探索問題とその双対問題に表れるノードポテンシャル変数の関係⁴⁹⁾ より、 ϕ_i^t はダミー起点から時刻 t のノード i への最短経路コスト (ノードポテンシャル) であるといえる. なお、ダミー起点からダミー終点までの最短経路コストは $\phi_0^{t_{\max}+1}$ で表される.

そして、式 (2a) は、時刻 t のリンク ij のフロー x_{ij}^t が正であれば同リンクが起点から終点までの最短経路上にあり (第一の場合)、フローがゼロであれば最短経路上にあるとは限らない (第二の場合) ことを意味し

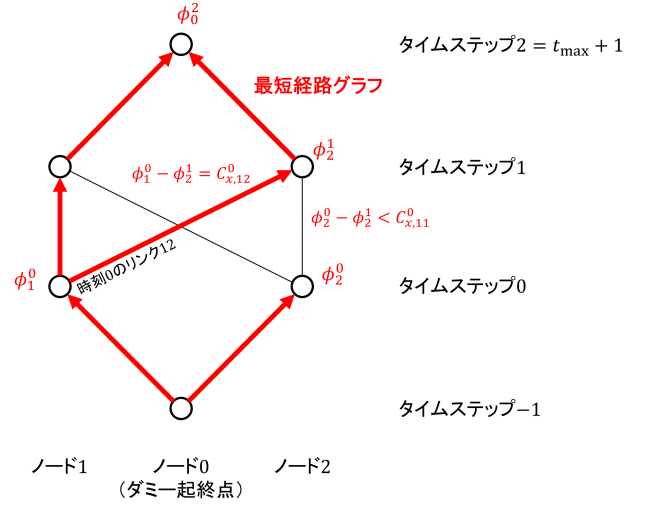


図-5: 時空間ネットワーク中の最短経路とリンクコストの関係

ている. これは全てのリンクについて成り立つ. そのため、任意の経路のフローが正であればそのコストは最小値 $\phi_0^{t_{\max}+1}$ と等しく、フローがゼロであればその経路コストは最小値 $\phi_0^{t_{\max}+1}$ より大きい、か、せいぜい等しい. これは利用者均衡原理を満たす.

[DSO-AVLS] の解は式 (2a) を含む [KKT-DSO-AVLS] を満たすので、題意は示された. $\square$

図-5 に定理 2 の模式図を示す. これは、空間的なノードが 2 個、実タイムステップが 2 個の小規模な時空間ネットワークを示している. ϕ_i^t はダミー起点から各ノードへの最短経路コストである. 仮にある時刻 t のリンク ij がその最短経路上にあるのであれば、そのリンクコスト $C_{x,ij}^t$ は式 (2a) の第一の場合を満たす. この図では例えば、時刻 0 のリンク 12 がその場合に該当し、時刻 0 のリンク 11 は該当しない. そして、フロー x_{ij}^t はダミー起点からダミー終点を結ぶ最短経路上のみで正になる. この場合であれば、経路をそれが通る空間的ノードの番号の順番で表記すると、経路 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 0$ と経路 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ が最短経路であり、その 2 経路を有人車両が移動しうる. なお、経路 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ はノード 1 で待機し続けるという意味であり、空間的には移動しない.

続けて、他の移動主体についても以下が成り立つ.

定理 3. 自動走行車両が時刻 t にリンク ij を移動するリンクコストを式 (2b) に現れる項 $\alpha_Y d_{ij} - \rho_y p_{y,ij}^t + q_{y,ij}^t$ であるとする. すると、[DSO-AVLS] の解の自動走行車両のフロー y_{ij}^t は利用者均衡状態を満たす.

証明. 定理 2 の証明と同様であるので省略. $\square$

定理 4. 貨物が時刻 t にリンク ij を移動するリンクコストを式 (2c) に現れる項 $p_{x,ij}^t + p_{y,ij}^t + p_{\gamma,ij}^t$ であるとする。これはより具体的には、有人車両によって輸送されているときはコスト $p_{x,ij}^t$ 、自動走行車両によって輸送されているときはコスト $p_{y,ij}^t$ 、物流拠点によって輸送されているときはコスト $p_{\gamma,ij}^t$ がかかるという意味である。さらに、貨物はその目的地への到着時刻 t に応じて追加的なコスト $g^{k,t}$ がかかるとする。すると、[DSO-AVLS] の解の貨物のフロー $z_{rs,ij}^{k,l,t}$ は利用者均衡状態を満たす。

証明. 定理 2 の証明とほぼ同様であるので概略のみ述べる。

まず、ある OD ペア rs 、最遅到着時刻 l 、希望到着時刻 k を持つ貨物について、目的地到着時刻が同一であればフロー $z_{rs,ij}^{k,l,t}$ が利用者均衡状態にあることを式 (2c) を用いて定理 2 の証明と同様に示す。このとき、目的地への最短経路コストは目的地到着時刻を t として $\pi_{rs,s}^{k,l,t}$ となる。

次に、式 (2h) より、その貨物の目的地到着フロー $z_{rs,s0}^{k,l,t}$ が正であれば最短経路コストとスケジュールコスト $g^{k,t}$ の和が一定値 $-\lambda_{rs}^{k,l}$ に等しく、目的地到着フローがゼロであれば最短経路コストとスケジュールコストの和が $-\lambda_{rs}^{k,l}$ より大きいかせいぜい等しいことがわかる。これは、利用されている目的地到着時刻と経路の組合せは全てコストが等しく、利用されていない組合せのコストより小さいかせいぜい等しいという意味である。これは利用者均衡原理を満たす。□

以上により、自己利益を最大化しようと合理的に行動する貨物（荷受人）と車両（輸送業者）を前提としたときに、[DSO-AVLS] で求めたシステム最適状態の車両・貨物フロー・拠点配置を実現するには、[KKT-DSO-AVLS] に現れる変数の課金を課せば良いといえる。なお、実際に課すべき最適課金の値は、[DSO-AVLS] の双対問題を解けば明示的に求められる。以降の節では、最適課金に関して成り立つ理論的性質を述べる。

b) 最適課金の発生と分担の性質

まず、課金が発生する条件を明らかにする。式 (2i) によると、時刻 t にリンク ij を移動する有人車両に課金がかかるのは、その交通量 x_{ij}^t が交通容量と等しい時のみである。言い換えると、交通容量を使い切ったときにのみ課金が生じる。これは限界費用課金と定性的に同様の考え方であり、合理的な性質である。式 (2j)–(2m) より、自動走行車両と貨物に対する課金に対しても同様の性質が成り立つことがわかる。

次に、課金の受け取り手を分析する。前節より、最適課金のもとで有人車両、自動走行車両、貨物がそれぞれ時刻 t にリンク ij を移動するときにかかるコスト

$C_{x,ij}^t, C_{y,ij}^t, C_{z,ij}^t$ は下式となる：

$$C_{x,ij}^t = \alpha_X(t_{ij} + \alpha_{dx}d_{ij}) - \rho_x p_{x,ij}^t + q_{x,ij}^t \quad (3)$$

$$C_{y,ij}^t = \alpha_Y d_{ij} - \rho_y p_{y,ij}^t + q_{y,ij}^t \quad (4)$$

$$C_{z,ij}^t = p_{x,ij}^t + p_{y,ij}^t + p_{\gamma,ij}^t \quad (5)$$

この式より、それぞれの主体が支払う課金をどの主体が受け取るのかを明らかにできる。

まず、式 (3) に現れる $\alpha_X(t_{ij} + \alpha_{dx}d_{ij})$ と式 (4) の $\alpha_Y d_{ij}$ は金銭的成本ではないので受け取り手は存在しない。

次に、貨物が有人車両で輸送するときに支払う課金 $p_{x,ij}^t$ に着目すると、これは式 (5) と式 (3) にのみ現れる。これは式 (3) ではマイナスの係数がかかっているため、有人車両はこの金銭を受け取ると解釈できる。係数 ρ_x は車両の最大貨物積載量である。前述の課金の発生の性質より、非ゼロの課金が生じるのは貨物が最大積載量と等しい量輸送されている時のみである。そのため、 $\rho_x p_{x,ij}^t$ はこのリンクを輸送されている全ての貨物が支払う総課金額と等しい。つまり、有人車両はそれが輸送する貨物が支払う課金の受け取り手である。同様に、自動走行車両もそれが輸送する貨物が支払う課金の受け取り手である。なお、この課金は輸送サービスの対価として支払う料金とは異なる概念である。

貨物が物流拠点で支払う課金 $p_{\gamma,ij}^t$ と、有人車両と自動走行車両が道路で支払うべき課金 $q_{x,ij}^t, q_{y,ij}^t$ の受け取り手は、次節に述べる理由から公共であると見なせる。

c) 物流拠点整備の self-financing 原則

貨物が物流拠点で支払う課金 $p_{\gamma,ij}^t$ に着目すると、自動走行物流システムの拠点整備に関する重要な性質が導出できる。すなわち、物流拠点整備に要する費用は物流拠点で利用者に課す料金で賄える、という self-financing 原則⁵⁰⁾ である。これは以下の定理として表現される。

定理 5. 物流拠点リンク ij の整備に要したコスト $\alpha_C C_{ij} \gamma_{ij}$ と、同リンクを利用した全ての貨物が支払った課金の総額 $\sum_t (p_{\gamma,ij}^t \sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t})$ について、以下の関係が成り立つ：

$$\alpha_C C_{ij} \gamma_{ij} \leq \sum_t \left(p_{\gamma,ij}^t \sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t} \right) \quad (6)$$

証明. 前節の議論より、貨物に非ゼロの課金がかかるのは輸送量が容量と等しい時のみである。そのため任意の ij について

$$\sum_t \left(p_{\gamma,ij}^t \sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t} \right) = \sum_t p_{\gamma,ij}^t \gamma_{ij} \quad (7)$$

が成り立つので、式 (6) は

$$\alpha_C C_{ij} \gamma_{ij} \leq \sum_t p_{\gamma,ij}^t \gamma_{ij} \quad (8)$$

に変形でき、これを示せばよい。

式 (2d) より、物流拠点リンク ij で全時刻に渡り単位貨物に課された課金の和 $\sum_t p_{\gamma,ij}^t$ について下式が成り立つ：

$$\sum_t p_{\gamma,ij}^t = \alpha_C c_{ij} + \hat{\theta}_{ij} - \theta_{ij} \quad (9)$$

$\hat{\theta}_{ij}$ と θ_{ij} の値は γ_{ij} の値によって異なるので、それに応じて場合分けをする。

(i) $\gamma_{ij} = 0$ の場合、式 (8) の両辺ともにゼロであるので式 (8) は等号成立する。

(ii) $0 < \gamma_{ij} < \gamma_{ij}^{\max}$ の場合、式 (2n), (2o) より $\theta_{ij} = \hat{\theta}_{ij} = 0$ であるので、式 (9) は

$$\sum_t p_{\gamma,ij}^t = \alpha_C c_{ij} \quad (10)$$

になる。両辺に γ_{ij} をかけると

$$\sum_t p_{\gamma,ij}^t \gamma_{ij} = \alpha_C c_{ij} \gamma_{ij} \quad (11)$$

よって式 (8) は等号成立する。

(iii) $\gamma_{ij} = \gamma_{ij}^{\max}$ の場合、式 (2o) より $\hat{\theta}_{ij} = 0$, $\theta_{ij} \geq 0$ であるので、式 (9) は

$$\sum_t p_{\gamma,ij}^t = \alpha_C c_{ij} - \theta_{ij} \quad (12)$$

になる。両辺に γ_{ij} をかけると

$$\sum_t p_{\gamma,ij}^t \gamma_{ij} = \alpha_C c_{ij} \gamma_{ij} - \theta_{ij} \gamma_{ij} \quad (13)$$

$\theta_{ij} \gamma_{ij} \geq 0$ なので式 (8) は成り立つ。

以上より、全ての γ_{ij} の値について式 (6) が成り立つことが示された。□

なお、定理 5 の証明より明らかなように、仮に物流拠点の大きさに制約 $\gamma_{ij}^{\max}$ がない場合、課金収入と物流拠点整備費用は常に等しくなる。

これは自動車の通勤混雑に対する課金と道路容量の拡張の文脈で論じられてきた self-financing 原則^(50,47) と同等の性質である。この性質が成り立つのは整備費用がその規模に対して一次同次である（式 (1r)）という仮定に依拠しており必ずしも現実的ではない場合もあるが、一定の指針として有用であろう。

d) 車両の整備・運用コスト

[DSO-AVLS] は有人車両と自動走行車両それぞれの最適台数 N , M の決定問題も含んでいた。この決定問題は部分的には、それぞれの車両の一台当たりの固定費用を α_N, α_M とし、固定費用が出来るだけかからないような最適台数を求めるものであった。実は [DSO-AVLS] の解では、車両の固定費用と運行費用の和は車両が得る課金収支と同一になることが保証される。

まず自動走行車両について示す。自動走行車両 m を整備しそれが一連の運行で経路 $\mathcal{R}_m$ を移動したときの

総コスト収支 C_m （正が支出）は

$$C_m = \alpha_M + \sum_{(ij,t) \in \mathcal{R}_m} C_{y,ij}^t \quad (14)$$

$$= \alpha_M + \sum_{(ij,t) \in \mathcal{R}_m} (\alpha_Y d_{ij} - \rho_y p_{y,ij}^t + q_{y,ij}^t) \quad (15)$$

で表される。ここで、以下の定理が成り立つ：

定理 6. 任意の m について $C_m = 0$ 。

証明. 全ての自動走行車両のコスト収支 $\sum_m C_m$ を考える。

$$\sum_m C_m = \sum_i \alpha_M y_{0i}^0 + \sum_{ij,t} (\alpha_Y d_{ij} - \rho_y p_{y,ij}^t + q_{y,ij}^t) y_{ij}^t \quad (16)$$

これは式 (2b), (2f) より以下に変形できる：

$$\sum_m C_m = - \sum_i \psi_i^0 y_{0i}^0 + \sum_{ij,t} (\psi_i^t - \psi_j^{t+t_{ij}}) y_{ij}^t \quad (17)$$

$$= \sum_{ij,t} (\psi_i^t - \psi_j^{t+t_{ij}}) x_{ij}^t \quad (18)$$

$$= - \sum_{i,t} \psi_i^t \left(\sum_j y_{ji}^{t-t_{ji}} - \sum_j y_{ij}^t \right) \quad (19)$$

この右辺は式 (1i) よりゼロである。つまり、

$$\sum_m C_m = 0 \quad (20)$$

が成り立つ。定理 3 の均衡条件より全ての自動走行車両は同じコスト収支であるので、式 (20) より任意の m について $C_m = 0$ が成り立つ。□

有人車両も同様に示せる。

定理 7. 有人車両 n を整備しそれが一連の運行で経路 $\mathcal{R}_n$ を移動したときの総コスト収支 C_n （正が支出）は常にゼロである。

証明. 定理 6 の証明と同様であるので省略。□

これは、最適車両数を整備し運行する費用は、貨物に対する課金により賄えるという意味である。これは前節の物流拠点に関する self-financing 原則と同様の結果でもあり、物流車両を動くインフラと見なしたときの self-financing 原則ともいえる。

4. おわりに

本研究では、自動走行物流システムを対象に、その物流拠点設計、車両と貨物の輸送スケジュール、動的な料金設計の最適化問題を定式化した。ここでは、高速道路上の専用車線を自動走行車両が走行し、高速道路上の一般車線と一般道を有人車両が走行し、道路沿いの物流拠点にて貨物の自動走行車両から有人車両への積み替えがなされる複合一貫輸送によるシステムを

想定した。他の交通流と共用する道路での交通容量制約を考慮したうえで、それに応じた動的課金を求める点が特徴の一つである。なお、本研究の用いる方法論は、数理的には旅客輸送のための共有型自動運転システムについての既存研究^{46),5)}の単純な拡張である。本研究の貢献は、この方法論が自動走行物流システム特有の問題を扱うのにも有用であることを示し、その結果得られた知見を報告した点にある。

その知見を以下にまとめる。社会的なコストを最小化するシステム最適状態は、輸送業者と荷受人が自己利益を合理的に最大化する状況でも、適切な動的課金によって実現できる。その最適課金額はシステム最適状態を計算するのと等価な方法で線形計画法により計算できる。課金は道路の交通容量や物流拠点の貯留容量・積み替え能力が使い切られている時間と場所でのみ発生する。課金は貨物がそれを輸送する車両あるいは物流拠点に支払い、車両は公共に支払う。物流拠点整備費用は、その拠点を利用する貨物からの課金収入により完全に賄える。自動走行車両を含む車両の整備・運用コストも、それらが輸送する貨物からの課金収入により完全に賄える。

今後の展開には以下が考えられる。まず、高速道路の自動走行専用車線の車線数を決定する問題が考えられる。自動走行専用車線をどこにどれくらい配置すべきかは自明ではなく、また自動走行車線数を増やすと一般車線が減るといった相互作用もあり、道路空間の再構成に新たな知見をもたらす興味深い問題になる可能性がある。これは、 $\mu_{x,ij}^t, \mu_{y,ij}^t$ を決定変数とし関連する制約条件を追加するように問題を拡張すれば考慮できる⁵¹⁾。ここでも、道路に対する混雑課金により道路整備費用を賄えるとする self-financing 原則が成り立つと予想される⁵⁾。

また、列車を利用した物流システムの組込みも重要な課題である。例えば、自動走行物流システムのありうる一形態として、物流拠点で自動走行車両から列車に貨物を積み替えて都心に効率的に運び込むようなシステムが想定される。この場合、列車とそのダイヤは本研究の自動車のような連続変数による近似的モデル化ではなく、離散変数を用いたモデル化が適切な可能性がある。そのようなモデル化は、共有型自動運転と固定経路大量輸送機関の統合最適化問題を定式化した Maruyama and Seo⁵²⁾の方法論を組み込んだ混合整数計画問題とすれば可能である。

最後に、数値実験により提案手法の性質を示すものも有望である。提案手法は線形計画問題として定式化されているため、数値実験の実施自体は容易である。本論文は提案手法の理論的性質の提示が主題であったため数値例は示さなかったが、具体的・定量的な政策的

含意を得るためには数値例が有用な可能性がある。

付録 A：記法まとめ

一覧性のため、以下に本研究で用いる主な（物理的・政策的意味のある）数学記号の記法をまとめる。

t_{ij}	リンク ij の移動時間
d_{ij}	リンク ij の長さ
x_{ij}^t	時刻 t のリンク ij の有人車両移動台数
y_{ij}^t	時刻 t のリンク ij の自動走行車両移動台数
$z_{rs,ij}^{k,l,t}$	時刻 t のリンク ij の、出発地 r 、目的地 s 、希望到着時刻 k 、最遅到着時刻 l の貨物移動数
$\mu_{x,ij}^t, \mu_{y,ij}^t$	$i \neq j$ のとき、時刻 t のリンク ij の物流車両（ x ：有人、 y ：自動走行）が利用可能な交通容量。 $i = j$ のとき、時刻 t のノード i の物流車両が利用可能な車両待機容量。
ρ_x	有人車両一台当たりの最大貨物積載量
ρ_y	自動走行車両一台当たりの最大貨物積載量
γ_{ij}	$i \neq j$ のとき、物流拠点リンク ij の、時間当たりの最大貨物積み替え単位数。 $i = j$ のとき、物流拠点ノード i の、最大貨物貯留容量。
N	有人車両の総台数
M	自動走行車両の総台数
X	有人車両の運用にかかるコスト
Y	自動走行車両の運用にかかるコスト
G	貨物の輸送にかかるコスト
C	拠点整備にかかる金銭的成本
$\alpha_X, \alpha_Y, \alpha_N, \alpha_M, \alpha_C, \alpha_G$	社会全体のコストを考える際の添字の要素の重み係数
α_{dx}	有人車両の運行コストのうち、走行距離コストの係数
$g^{k,t}$	希望到着時刻 k の貨物が、時刻 t に到着することによりかかるコスト
$f_{rs}^{k,l}$	出発地 r 、目的地 s 、希望到着時刻 k 、最遅到着時刻 l の貨物の総需要
c_{ij}	物流拠点リンク ij の容量拡張に要する単位当たりコスト
$\gamma_{ij}^{\max}$	γ_{ij} のそれぞれ最大値
$\mathcal{L}_{\text{ODD}}$	限定領域リンク集合
$\mathcal{L}_{\text{nonODD}}$	非限定領域リンク集合
$\mathcal{L}_{\text{log}}$	物流拠点リンク集合
$\mathcal{T}_l$	最遅到着時刻 l の貨物が移動可能な時刻集合
$t_{\max}$	最終時刻
ϕ_i^t	x_{ij}^t のノード保存則に対する Lagrange 乗数で、

有人車両の起点からの最短経路コストを意味する

ψ_i^t y_{ij}^t のノード保存則に対する Lagrange 乗数で、自動走行車両の起点からの最短経路コストを意味する

$\pi_{rs,i}^{k,l,t}$ $z_{rs,ij}^{k,l,t}$ のノード保存則に対する Lagrange 乗数で、貨物の起点からの最短経路コストを意味する

$p_{x,ij}^t$ $z_{rs,ij}^{k,l,t}$ に関する有人車両の貨物運搬制約に対する Lagrange 乗数で、有人車両が貨物に課す課金額を意味する

$p_{y,ij}^t$ $z_{rs,ij}^{k,l,t}$ に関する自動走行車両の貨物運搬制約に対する Lagrange 乗数で、自動走行車両が貨物に課す課金額を意味する

$p_{\gamma,ij}^t$ $z_{rs,ij}^{k,l,t}$ に関する物流拠点の貨物運搬制約に対する Lagrange 乗数で、物流拠点が貨物に課す課金額を意味する

$q_{x,ij}^t$ x_{ij}^t に関する交通容量制約に対する Lagrange 乗数で、道路が有人車両に課す課金額を意味する

$q_{y,ij}^t$ y_{ij}^t に関する交通容量制約に対する Lagrange 乗数で、道路が自動走行車両に課す課金額を意味する

謝辞：本研究の開始に当たっては、研究会「Transportation, Logistics and Urban Hub's Research Workshop」の参加者から有益な示唆を受けた。また、本研究の一部は JSPS 科研費 24K01002 の助成を受けた。ここに謝意を表する。

REFERENCES

- 1) Sindi, S. and Woodman, R.: Implementing commercial autonomous road haulage in freight operations: An industry perspective, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.152, pp.235–253, 2021.
- 2) Marzano, V., Tinessa, F., Fiori, C., Tocchi, D., Papola, A., Aponte, D., Cascetta, E., and Simonelli, F.: Impacts of truck platooning on the multimodal freight transport market: An exploratory assessment on a case study in Italy, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.163, pp.100–125, 2022.
- 3) Chottani, A., Hastings, G., Murnane, J., and Neuhaus, F.: Distraction or disruption? Autonomous trucks gain ground in US logistics, *McKinsey & Company*, 2018.
- 4) 国土交通省 自動物流道路に関する検討会: 自動物流道路のあり方 中間とりまとめ, 2024.
- 5) Seo, T., Maruyama, R., Wada, K., and Zhou, Y.: Dynamic system optimal pricing for shared autonomous vehicles in congestible networks: Theoretical properties, *Conference in Emerging Technologies in Transportation Systems (TRC-30)*, Crete, Greece, 2024.
- 6) Macharis, C. and Bontekoning, Y.: Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review, *European Journal of Operational Research*, Vol.153, No.2, pp.400–416, 2004.
- 7) SteadieSeifi, M., Dellaert, N., Nuijten, W., Van Woensel, T., and Raoufi, R.: Multimodal freight transportation planning: A literature review, *European Journal of Operational Research*, Vol.233, No.1, pp.1–15, 2014.
- 8) Archetti, C., Peirano, L., and Speranza, M. G.: Optimization in multimodal freight transportation problems: A Survey, *European Journal of Operational Research*, Vol.299, No.1, pp.1–20, 2022.
- 9) Arnold, P., Peeters, D., Thomas, I., and Marchand, H.: Pour une localisation optimale des centres de transbordement intermodaux entre réseaux de transport: formulation et extensions, *Canadian Geographies / Géographies canadiennes*, Vol.45, No.3, pp.427–436, 2001.
- 10) Arnold, P., Peeters, D., and Thomas, I.: Modelling a rail/road intermodal transportation system, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.40, No.3, pp.255–270, 2004.
- 11) Shintani, K., Imai, A., Nishimura, E., and Papadimitriou, S.: The container shipping network design problem with empty container repositioning, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.43, No.1, pp.39–59, 2007.
- 12) Barnhart, C. and Schneur, R. R.: Air Network Design for Express Shipment Service, *Operations Research*, Vol.44, No.6, pp.852–863, 1996.
- 13) Bhattacharya, A., Kumar, S. A., Tiwari, M., and Talluri, S.: An intermodal freight transport system for optimal supply chain logistics, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.38, pp.73–84, 2014.
- 14) Benedyk, I. V., Peeta, S., Zheng, H., Guo, Y., and Iyer, A. V.: Dynamic Model for System-Level Strategic Intermodal Facility Investment Planning, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.2548, No.1, pp.24–34, 2016.
- 15) Yang, K., Yang, L., and Gao, Z.: Planning and optimization of intermodal hub-and-spoke network under mixed uncertainty, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.95, pp.248–266, 2016.
- 16) Poudel, S. R., Quddus, M. A., Marufuzzaman, M., Bian, L., and Burch, V. R. F.: Managing congestion in a multi-modal transportation network under biomass supply uncertainty, *Annals of Operations Research*, Vol.273, No.1-2, pp.739–781, 2019.
- 17) Mostert, M., Caris, A., and Limbourg, S.: Intermodal network design: A three-mode bi-objective model applied to the case of Belgium, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol.30, No.3, pp.397–420, 2018.
- 18) Mokhtar, H., Redi, A. P., Krishnamoorthy, M., and Ernst, A. T.: An intermodal hub location problem for container distribution in Indonesia, *Computers & Operations Research*, Vol.104, pp.415–432, 2019.
- 19) Leblanc, L. J.: An Algorithm for the Discrete Network Design Problem, *Transportation Science*, Vol.9, No.3, pp.183–199, 1975.
- 20) Loureiro, C. F. G. and Ralston, B.: Investment Selection Model for Multicommodity Multimodal Transportation Networks, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.1522, No.1, pp.38–46, 1996.
- 21) Yamada, T., Russ, B. F., Castro, J., and Taniguchi, E.: Designing Multimodal Freight Transport Networks: A Heuristic Approach and Applications, *Transportation Science*, Vol.43, No.2, pp.129–143, 2009.
- 22) Apivatanagul, P. and Regan, A. C.: Long haul freight

- network design using shipper-carrier freight flow prediction: A California network improvement case study, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.46, No.4, pp.507–519, 2010.
- 23) Yamada, T. and Febri, Z.: Freight transport network design using particle swarm optimisation in supply chain-transport supernetwork equilibrium, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.75, pp.164–187, 2015.
 - 24) Xin, X., Wang, X., Ma, L., Chen, K., and Ye, M.: Shipping network design-infrastructure investment joint optimization model: A case study of West Africa, *Maritime Policy & Management*, Vol.49, No.5, pp.620–646, 2022.
 - 25) Wang, X. and Meng, Q.: Discrete intermodal freight transportation network design with route choice behavior of intermodal operators, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.95, pp.76–104, 2017.
 - 26) Teye, C., Bell, M. G., and Bliemer, M. C.: Entropy maximising facility location model for port city intermodal terminals, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.100, pp.1–16, 2017.
 - 27) Teye, C., Bell, M. G. H., and Bliemer, M. C. J.: Urban intermodal terminals: The entropy maximising facility location problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.100, pp.64–81, 2017.
 - 28) Vickrey, W. S.: Congestion theory and transport investment, *The American economic review*, Vol.59, No.2, pp.251–260, 1969.
 - 29) Bilegan, I. C., Crainic, T. G., and Wang, Y.: Scheduled service network design with revenue management considerations and an intermodal barge transportation illustration, *European Journal of Operational Research*, Vol.300, No.1, pp.164–177, 2022.
 - 30) Wang, Z., Zhang, D., Tavasszy, L., and Fazi, S.: Integrated multimodal freight service network design and pricing with a competing service integrator and heterogeneous shipper classes, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.179, pp.103290, 2023.
 - 31) Nicolet, A. and Atasoy, B.: A choice-driven service network design and pricing including heterogeneous behaviors, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.191, pp.103740, 2024.
 - 32) Zhang, M., Janic, M., and Tavasszy, L.: A freight transport optimization model for integrated network, service, and policy design, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.77, pp.61–76, 2015.
 - 33) Zhang, D., Zhan, Q., Chen, Y., and Li, S.: Joint optimization of logistics infrastructure investments and subsidies in a regional logistics network with CO2 emission reduction targets, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.60, pp.174–190, 2018.
 - 34) Jiang, J., Zhang, D., Meng, Q., and Liu, Y.: Regional multimodal logistics network design considering demand uncertainty and CO2 emission reduction target: A system-optimization approach, *Journal of Cleaner Production*, Vol.248, pp.119304, 2020.
 - 35) Santos, B. F., Limbourg, S., and Carreira, J. S.: The impact of transport policies on railroad intermodal freight competitiveness – The case of Belgium, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.34, pp.230–244, 2015.
 - 36) Taheri, S. and Tamannaei, M.: Integrated Multi-Level Intermodal Network Design Problem: A Sustainable Approach, Based on Competition of Rail and Road Transportation Systems, *Networks and Spatial Economics*, Vol.23, No.1, pp.1–37, 2023.
 - 37) Janic, M.: Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.12, No.1, pp.33–44, 2007.
 - 38) Yang, Z., Xin, X., Chen, K., and Yang, A.: Coastal container multimodal transportation system shipping network design—toll policy joint optimization model, *Journal of Cleaner Production*, Vol.279, pp.123340, 2021.
 - 39) Yang, H., Shao, C., Wang, H., and Ye, J.: Integrated reward scheme and surge pricing in a ridesourcing market, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.134, pp.126–142, 2020.
 - 40) Holguín-Veras, J., Wang, Q., Xu, N., Ozbay, K., Cetin, M., and Polimeni, J.: The impacts of time of day pricing on the behavior of freight carriers in a congested urban area: Implications to road pricing, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.40, No.9, pp.744–766, 2006.
 - 41) Holguín-Veras, J.: Necessary conditions for off-hour deliveries and the effectiveness of urban freight road pricing and alternative financial policies in competitive markets, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.42, No.2, pp.392–413, 2008.
 - 42) Holguín-Veras, J. and Aros-Vera, F.: Self-supported freight demand management: Pricing and incentives, *EURO Journal on Transportation and Logistics*, Vol.4, No.2, pp.237–260, 2015.
 - 43) Holguín-Veras, J. and Sánchez-Díaz, I.: Freight Demand Management and the Potential of Receiver-Led Consolidation programs, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.84, pp.109–130, 2016.
 - 44) 武田翼・赤松隆: 交通・物流統合型モビリティ・サービスのメカニズム・デザイン, 第 67 回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2023.
 - 45) 和田健太郎, 渡邊大樹, 周毅カイ, 赤松隆: シェア型自動運転車のための通行権取引制度の自律分散的なインプリメンテーション, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol.64, 2021.
 - 46) 丸山稜太, 瀬尾亨: 共有型自動運転システムの動的最適課金の理論的導出, 土木計画学研究・講演集, Vol. 68, 2023.
 - 47) 赤松隆: 一般ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度, 土木学会論文集 D, Vol.63, No.3, pp.287–301, 2007.
 - 48) Wardrop, J. G.: Some theoretical aspects of road traffic research, *ICE Proceedings: Engineering Divisions*, Vol. 1, pp. 325–362, Thomas Telford, 1952.
 - 49) Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., and Orlin, J. B.: *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*, Prentice-Hall, 1993.
 - 50) Mohring, H. and Harwitz, M.: *Highway benefits: An analytical framework*, Northwestern University Press, 1962.
 - 51) Seo, T. and Asakura, Y.: Multi-objective linear optimization problem for strategic planning of shared autonomous vehicle operation and infrastructure design, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.23, pp.3816–3828, 2022.
 - 52) Maruyama, R. and Seo, T.: Integrated public transportation system with shared autonomous vehicles and fixed-route transits: Dynamic traffic assignment-based model with multi-objective optimization, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, Vol.21, pp.99–114, 2023.

(Received 2024-10-04)

(Accepted *)

Facility location and fare design for multimodal transport with automated vehicle logistic
system considering traffic flow capacity

Toru SEO and Riki KAWASE