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*・河瀬理貴

*東京科学大学（前東京工業大学）　土木・環境工学系　准教授

seo.t.aa@m.titech.ac.jp

2024-11-17　土木計画学秋大会

Institute of SCIENCE TOKYO

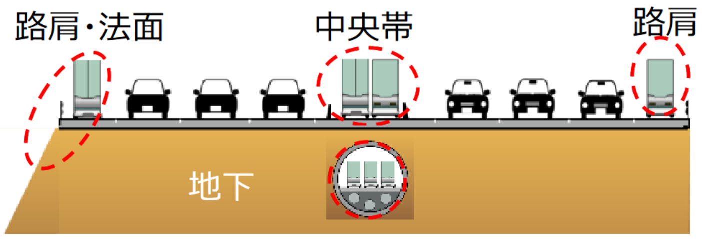
背景

- 自動走行物流システム・自動物流道路
  - 高速道路上の専用車線を自動走行車両が貨物を輸送するシステム
  - 効率的に大量の貨物を輸送できる
  - 自動走行専用空間を走行するので，走行技術上の実現可能性が高い

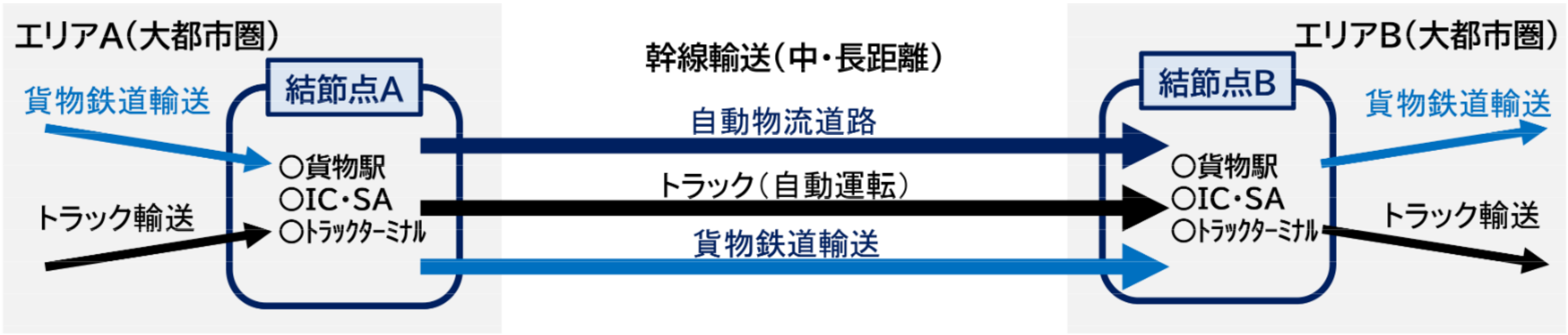
- 課題：自動走行車両は高速道路しか移動できないので，一般道の有人車両へ貨物を積み替える必要

- 物流拠点設計問題：高速道路沿いに積み替えのための物流拠点の位置と規模を決定する
  - 社会的コスト最小化が望ましい
  - 荷受人や輸送業者は自己利益を最大化するので，課金やインセンティブ施策も必要
  - 高速道路一般車線や一般道には他の交通流も流れており，時間的・空間的に交通容量が変化する

- 物流拠点設計問題は，動的に変化する交通流に合わせて，動的な運行スケジュールや課金を考慮したうえで解く必要がある



道路空間の利活用イメージ



出典：国交省資料：https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/buturyu_douro/pdf/chu-sankou.pdf, https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001754019.pdf

目的

- 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
  - 複合一貫輸送の一般的な問題である施設配置，車両と貨物の移動スケジュール，料金の決定問題を解く
  - 一般の交通流の容量制約により，輸送スケジュールや料金が動的に変化する点も考慮
  - 数値解だけではなく，理論的性質も明らかにする

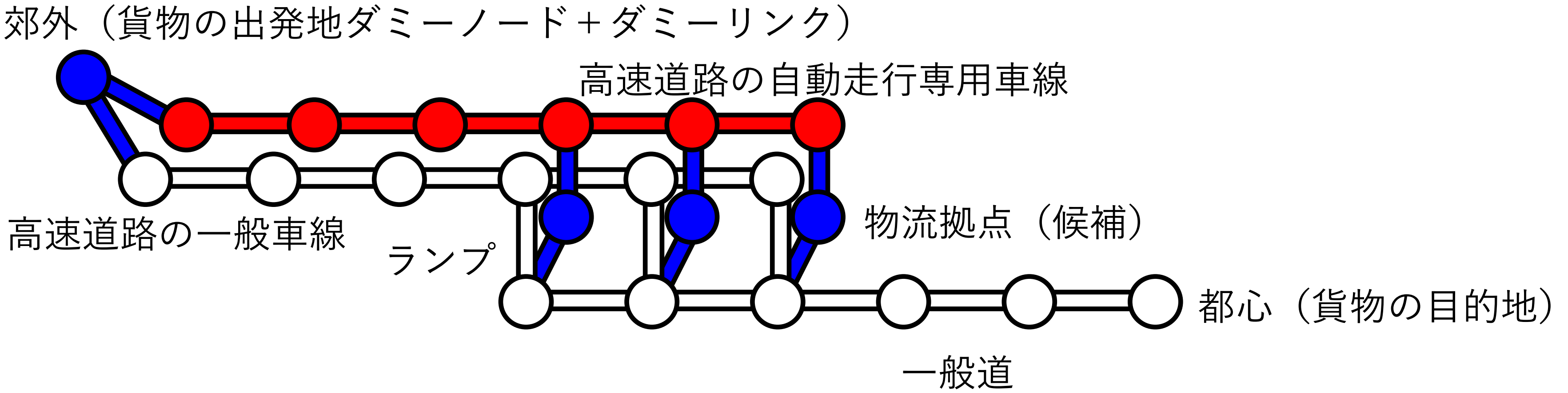
- 方法
  - 著者らがこれまでに開発した旅客用の共有型自動運転システムの最適化手法（瀬尾・朝倉 2020; Seo et al. 2024）の改変
  - 数理最適化問題としての定式化
  - 理論的性質の証明

瀬尾 亨, 朝倉 康夫: 多目的線形計画法による共有型自動運転システムの戦略的設計. 土木計画学研究・講演集, 2020
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.

問題設定

- 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
  - 典型的な状況：ある一日に郊外から都心へ貨物を輸送する状況

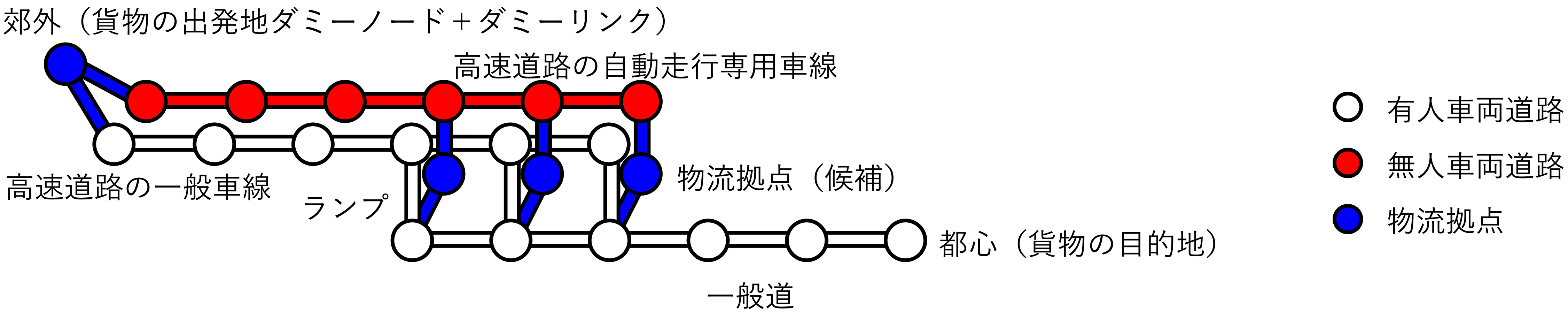
- 目的関数：社会的総コスト
- 主な決定変数
  - 物流拠点の位置と規模（同じ1日が長期間続くとしたら，あらかじめどう整備すべきか）
  - 自動走行車両・有人車両の数
  - 車両の運行スケジュール
  - 貨物の輸送スケジュール
  - 車両と貨物に課す課金額



問題設定

- 移動体
  - 有人車両：高速道路一般車線と一般道を走行可能
  - 自動走行車両：高速道路自動走行専用車線を走行可能
  - 貨物：車両に積載されているときは道路上を移動可能．物流拠点は自由に移動可能
  - 貨物の量は所与で固定
  - それぞれの車両は一定台数（決定変数）がネットワークを走り回り，貨物を複数回輸送しうる

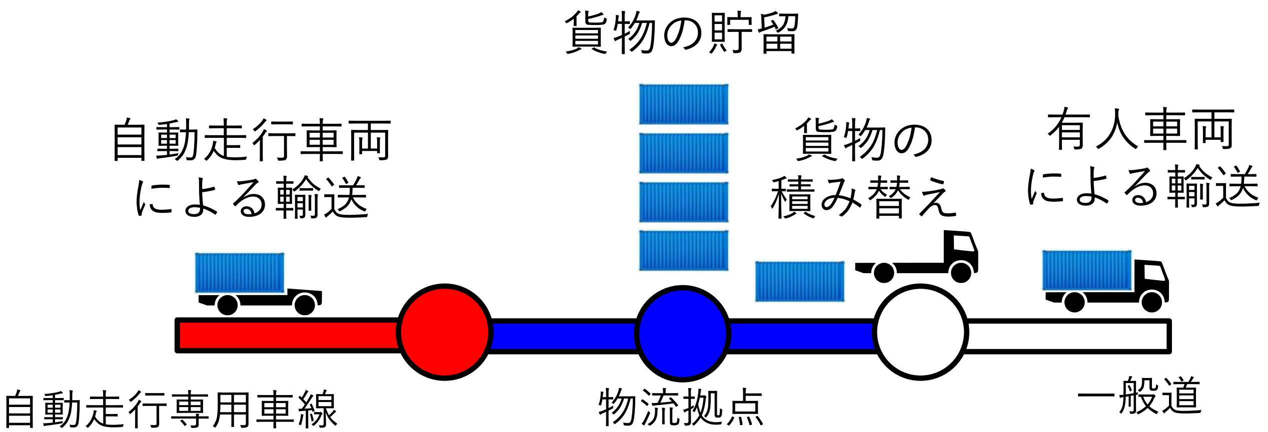
- 主な制約
  - 交通容量：単位時間あたりに道路を走行できる車両数
    - 有人車両の交通容量は，他の交通量に応じて時間帯に外生的に変化する
  - 駐車容量：ノードに停車可能な車両数
  - 貨物積載容量：車両あたりに積載可能な貨物量
  - 物流拠点の貨物のストック・フロー容量（決定変数）
  - 貨物の輸送需要は必ず満たす（ただし希望時刻ちょうどに到着できる保証はない）



問題設定

- 移動体
  - 有人車両：高速道路一般車線と一般道を走行可能
  - 自動走行車両：高速道路自動走行専用車線を走行可能
  - 貨物：車両に積載されているときは道路上を移動可能．物流拠点は自由に移動可能
  - 貨物の量は所与で固定
  - それぞれの車両は一定台数（決定変数）がネットワークを走り回り，貨物を複数回輸送しうる

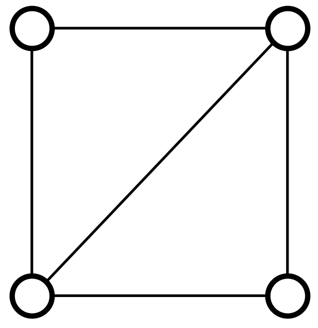
- 主な制約
  - 交通容量：単位時間あたりに道路を走行できる車両数
    - 有人車両の交通容量は，他の交通量に応じて時間帯に外生的に変化する
  - 駐車容量：ノードに停車可能な車両数
  - 貨物積載容量：車両あたりに積載可能な貨物量
  - 物流拠点の貨物のストック・フロー容量（決定変数）
  - 貨物の輸送需要は必ず満たす（ただし希望時刻ちょうどに到着できる保証はない）



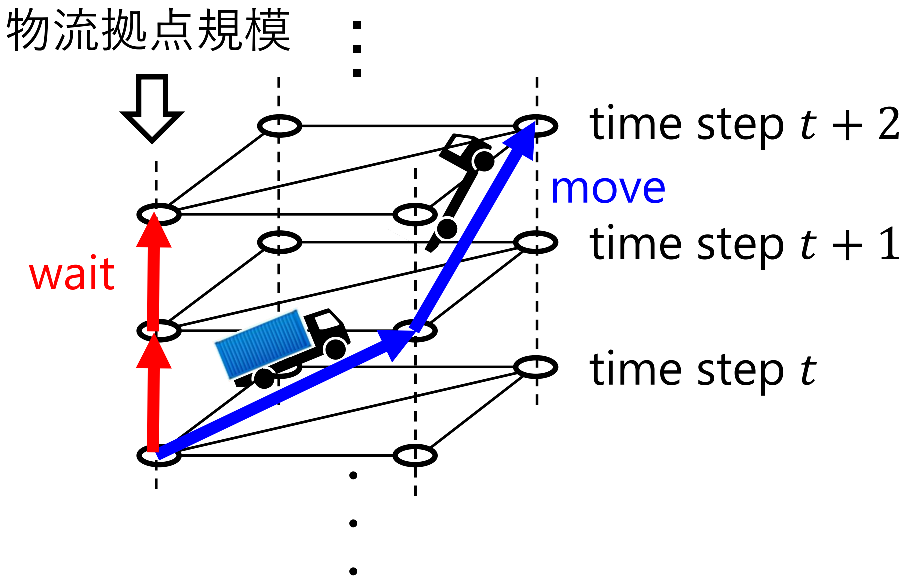
定式化

- 車両・貨物の移動量は，「時刻tのリンクijのフローx_{ij}^{t}」などの連続量としてモデル化
- 時空間拡張ネットワーク上の最小費用流問題[DSO-M-AVLS]として定式化
  - Dynamic System Optimum – Multimodal – Automated Vehicle Logistics System
  - 線形計画問題

- 目的関数：社会全体でかかる総コスト
  - 物流車両台数
  - 物流車両運用コスト
  - 貨物の早着・遅着コスト
  - 拠点整備コスト
- 決定変数
  - 物流拠点の位置と規模
  - 自動走行車両・有人車両の数
  - 車両・貨物の移動
  - 道路・拠点・車両の課金額



通常のネットワーク
を上から見た図

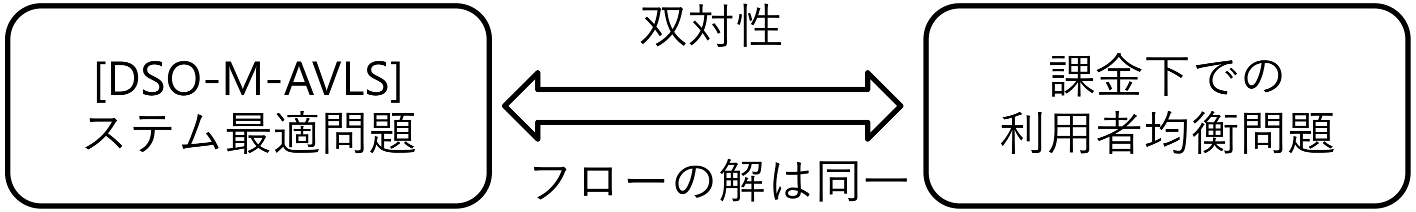


時空間拡張ネットワーク

理論解析

- [DSO-M-AVLS]はシステム最適解を求める問題である

- [DSO-M-AVLS]の最適性条件を解析すると， [DSO-M-AVLS]の解は有人車両・自動走行車両・貨物それぞれの主体が，特定の課金下で自己利益を最大化している「課金下での利用者均衡解」とみなせる
  - 課金はそれぞれの主体に対しリンク・ノード別，時刻別に課される
    - 自動的に最適動的課金額が求まる
  - 容量制約に対するLagrange乗数がその箇所の課金額になる
  - 赤松(2007)，Seo et al. (2023)などのアプローチ



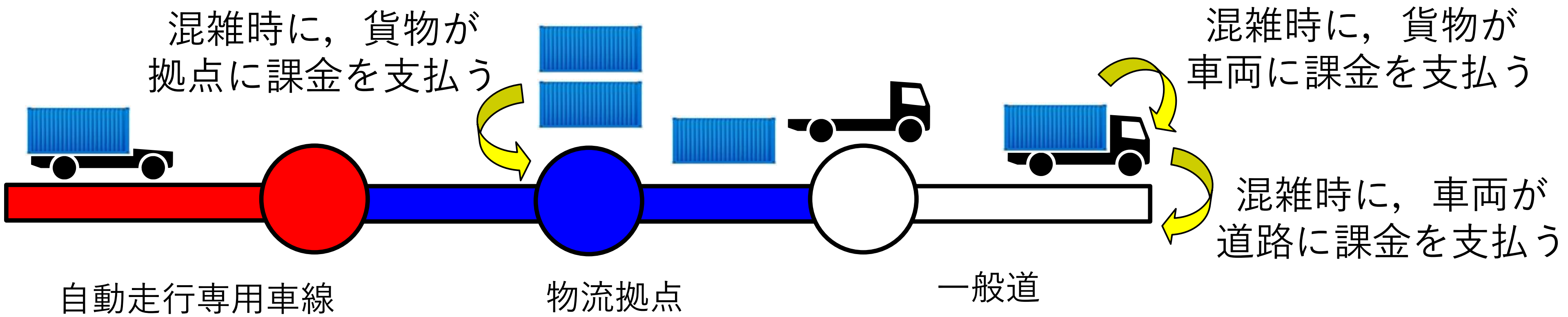
Lagrange乗数：課金額

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.
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.

定理

- モデルと最適性条件を解析すると，いくつかの性質が証明できる
  1. 車両に対する課金は，その車両が交通容量に達したリンクを通行中や，駐車容量に達したノードに停車中のみに課される
  2. 車両に課された課金は，公共が受け取る
  3. 貨物に対する課金も同様に，容量に達した車両や物流拠点を利用中のみに課される
  4. 貨物に課された課金は，それを輸送する車両や物流拠点（公共）が受け取る

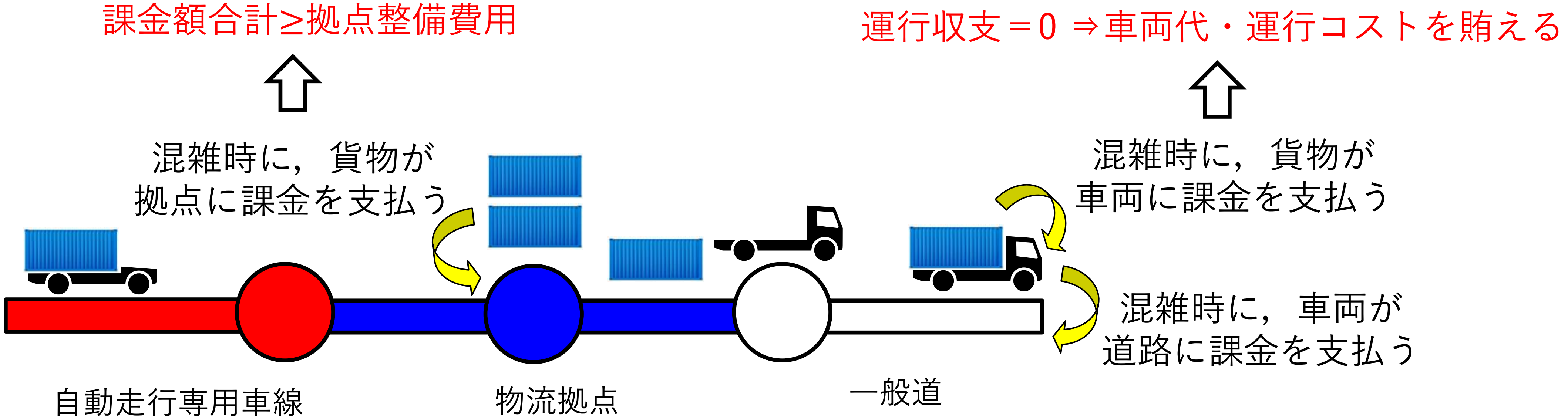
- 1., 3.は限界費用課金の考え方と整合的
- 2.は道路の混雑課金と全く同じ
- 4.で車両が課金を受け取るというのは，社会が特定の輸送に補助金を出していて，その資金源は貨物であるという解釈が妥当か
  - この課金は営利目的の代金とは別．本モデルでは代金は無視している



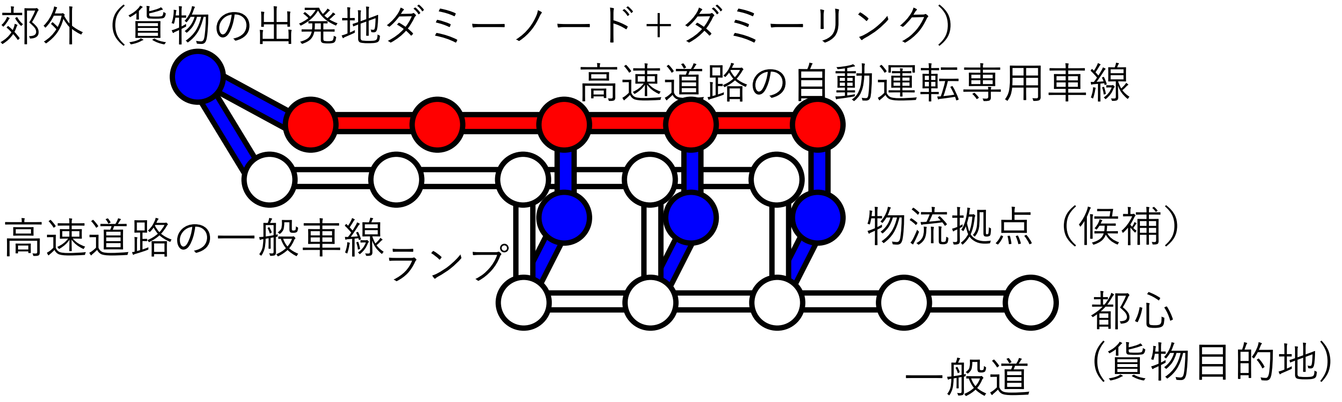
定理

- モデルと最適性条件を解析すると，いくつかの性質が証明できる
  5. 全ての車両の収支は期間全体で必ずゼロになる
     - 収支＝課金収入－車両費用－運行コスト－課金支出
  6. 物流拠点の整備費用は，その拠点を利用した貨物からの課金収入で完全に賄える

- これらは交通経済分野のself-financing原則と同等
  - 必要なインフラ（動くインフラとしての物流車両を含む）は，混雑を防ぐための課金により整備できる
- この問題で求めるのが1日の運行スケジュールであれば，拠点整備費用も1日当たりの減価償却費と解釈する

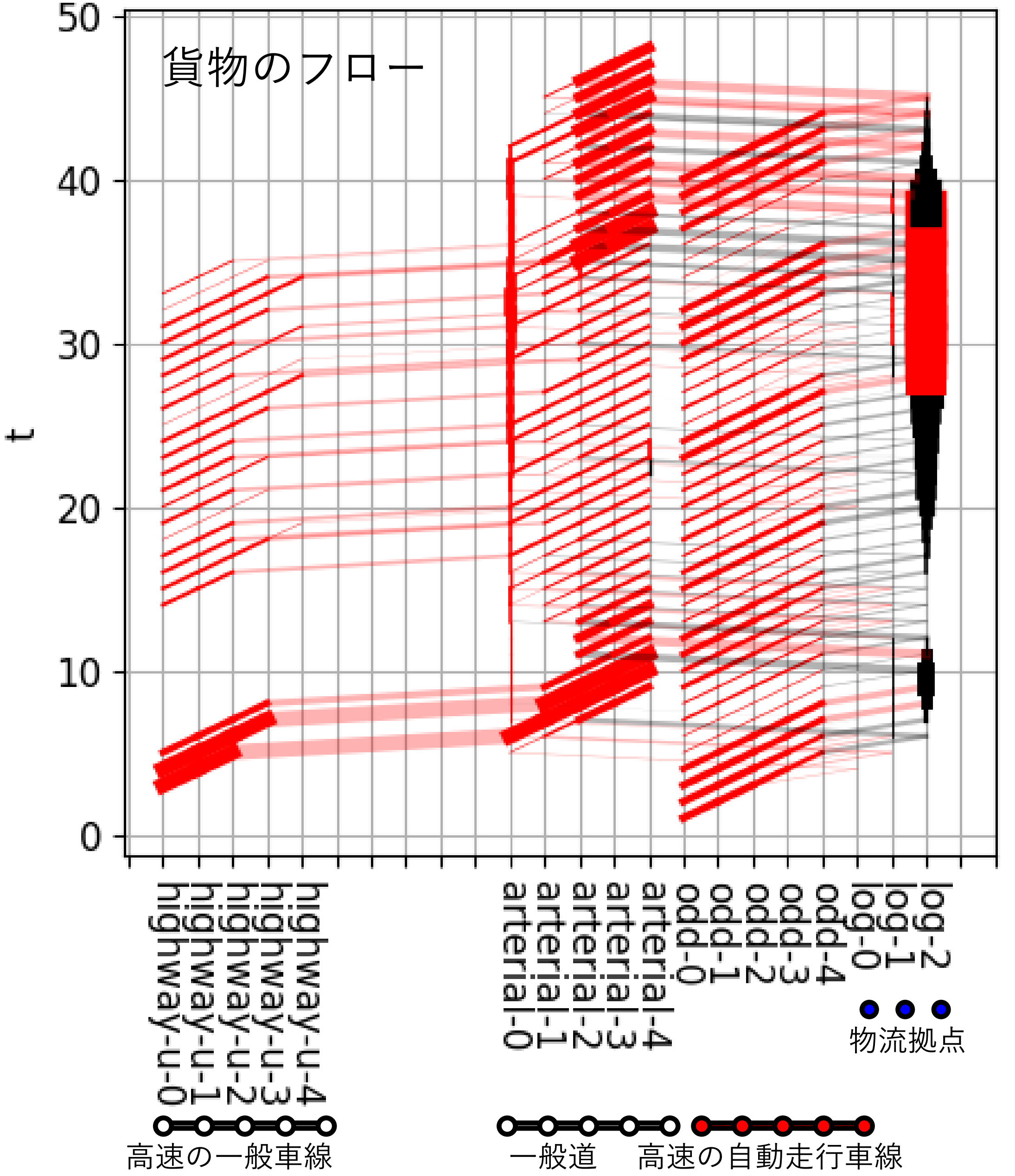


数値例

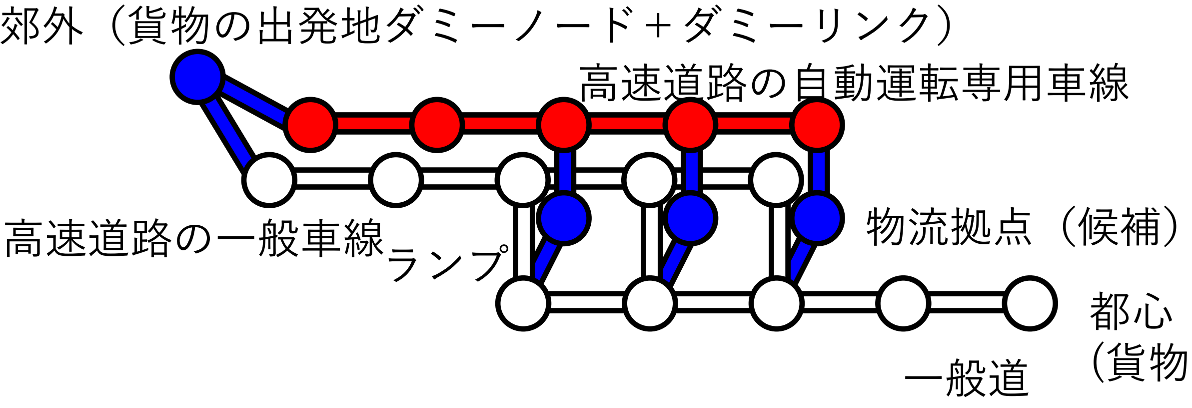


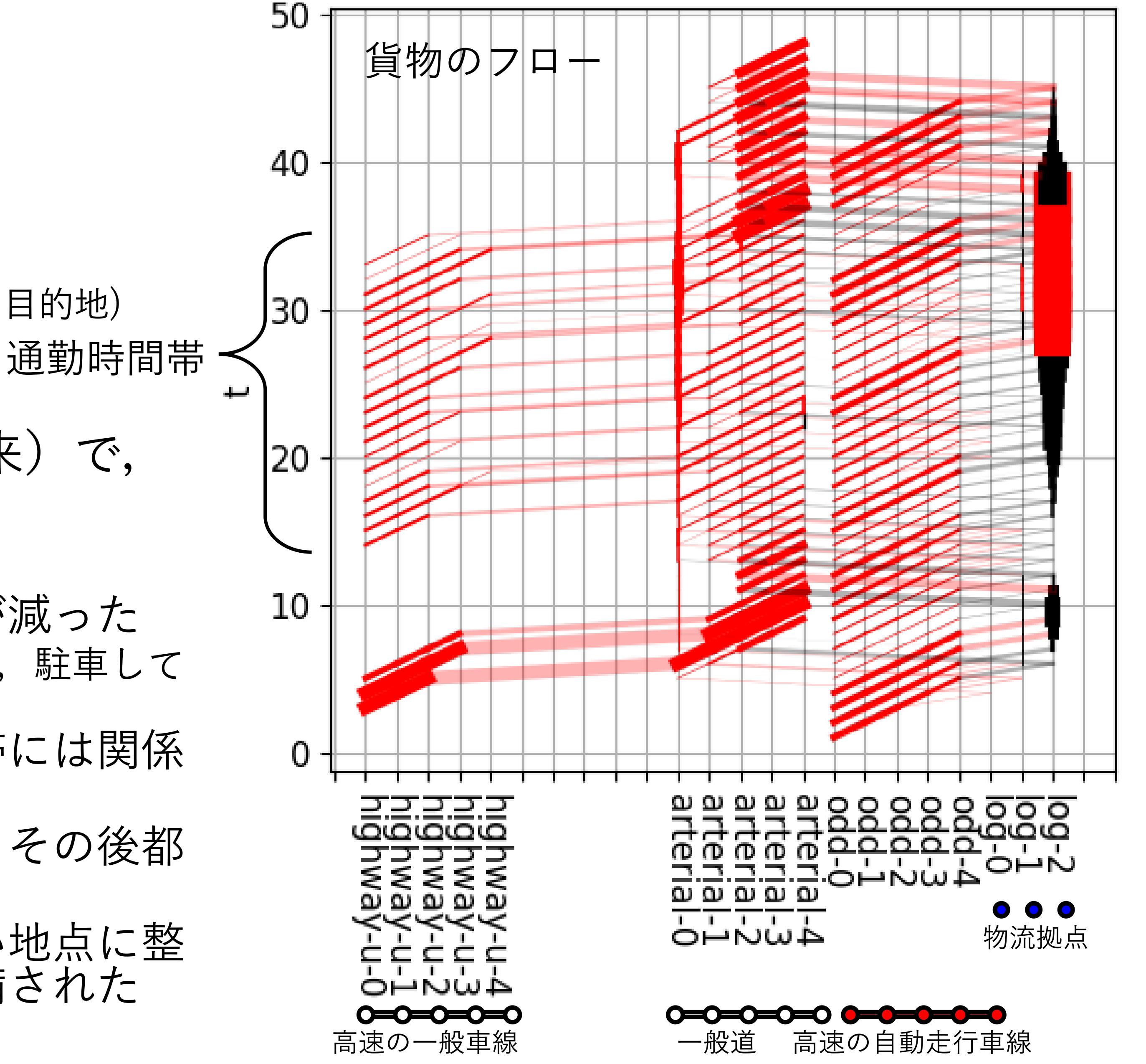
- 郊外から都心に貨物を輸送
- 物流拠点の候補は3か所
- 貨物の希望到着時刻はt=10, 25, 40
- t=15～35は通勤時間帯で一般道と高速一般車線の交通容量が小さい

- 右図：横軸ノード，縦軸時間（上ほど将来）で，貨物のフローを示す時空間図
  - 斜め線は移動中の貨物
  - 縦線は待機中の貨物
  - 太いほどフローが多い
  - 赤は容量制約に達したフロー



数値例

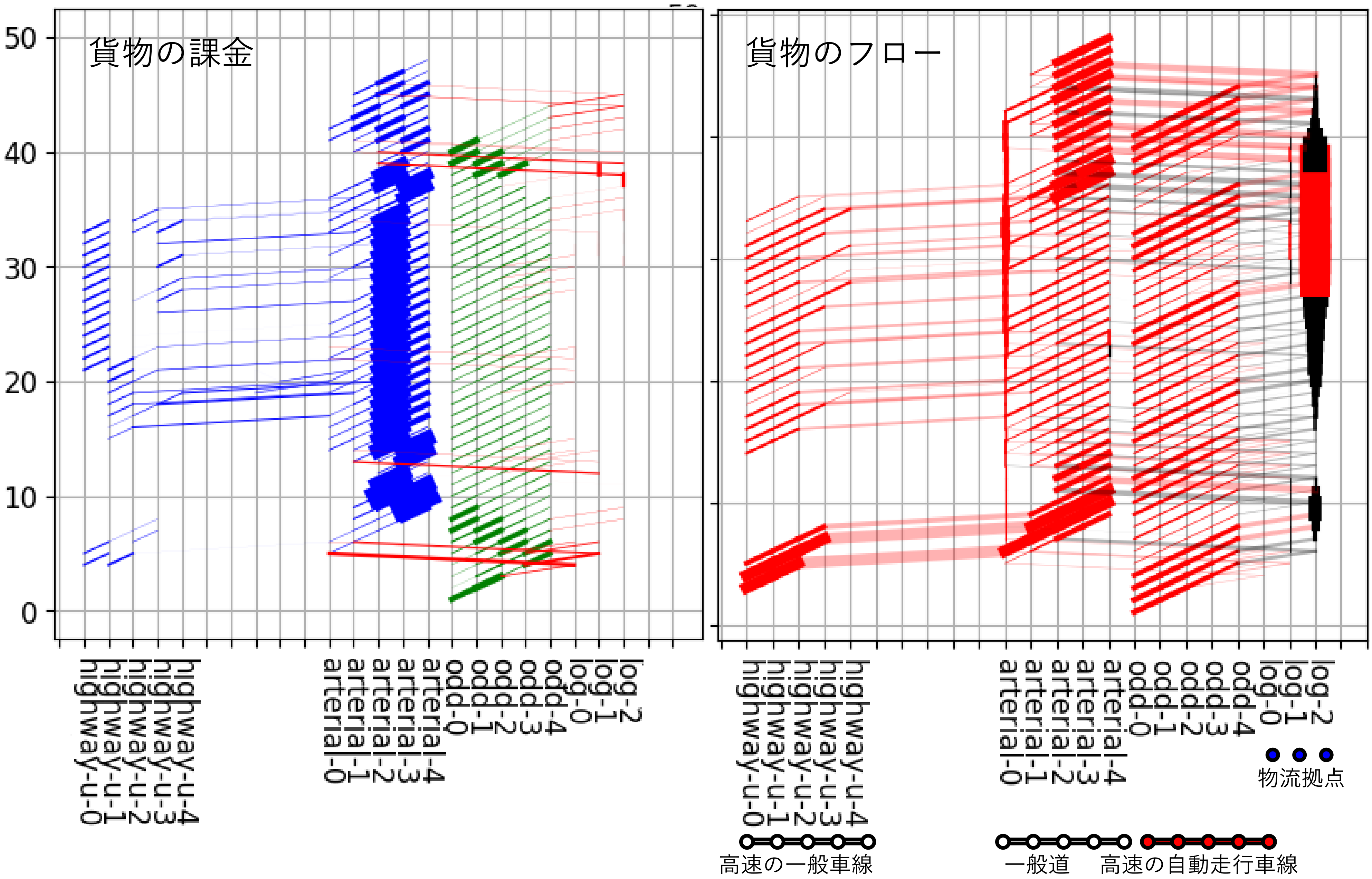




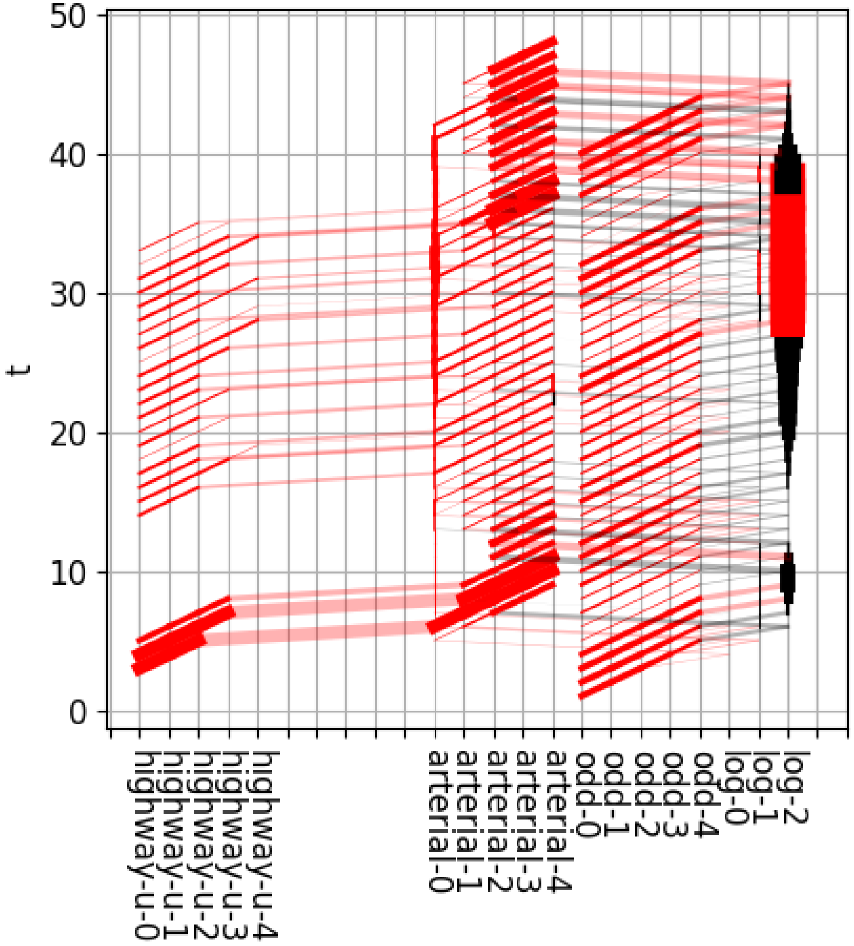
- 右図：横軸ノード，縦軸時間（上ほど将来）で，貨物のフローを示す時空間図
- 知見
  - 通勤時間帯は一般道の有人車両の輸送量が減った
    - 有人車両は比較的空いている高速道路に移るか，駐車して待機した
  - 自動走行車両は専用車線なので通勤時間帯には関係ない
  - 通勤時間帯は貨物は物流拠点に集積され，その後都心に運び込まれた
  - 物流拠点は，大型のものが都心に最も近い地点に整備され，小さいものがその次の地点に整備された

数値例

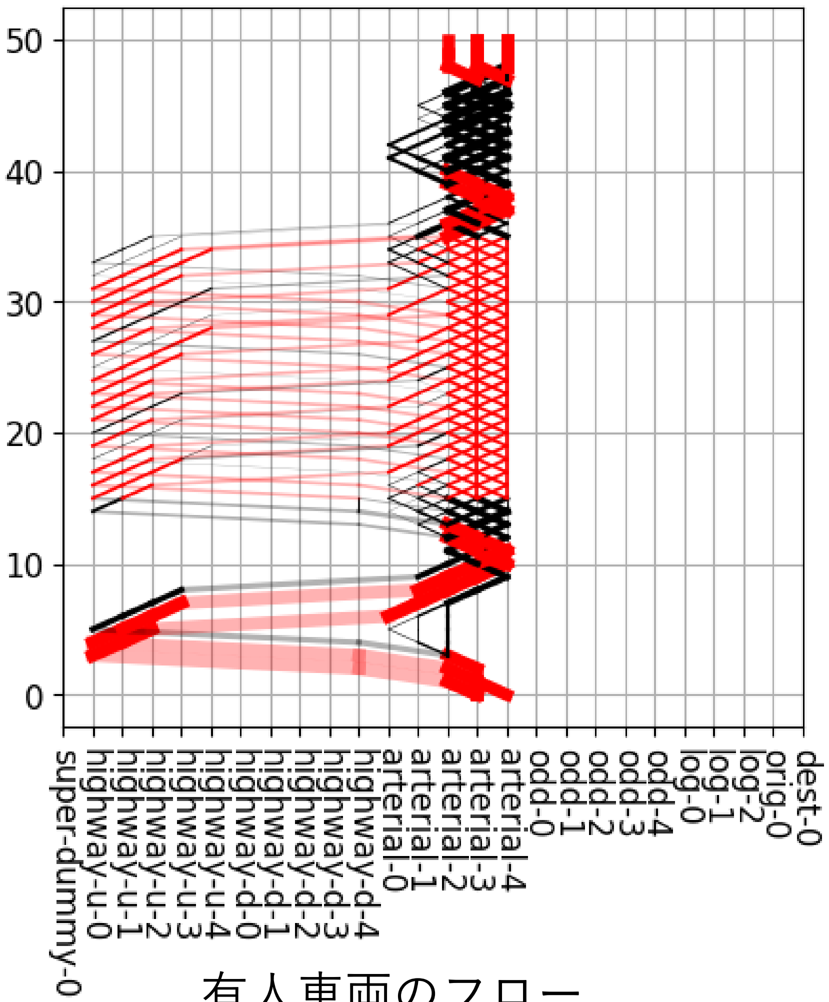
- 貨物に課された課金額を示す図
  - 青：有人車両への支払い
  - 緑：自動走行車両への支払い
  - 赤：物流拠点への支払い
- 通勤時間帯に一般道を運ばれるときの課金額が大
- 物流拠点の課金額は小さかった
  - 通勤時間帯前後は大きくなった



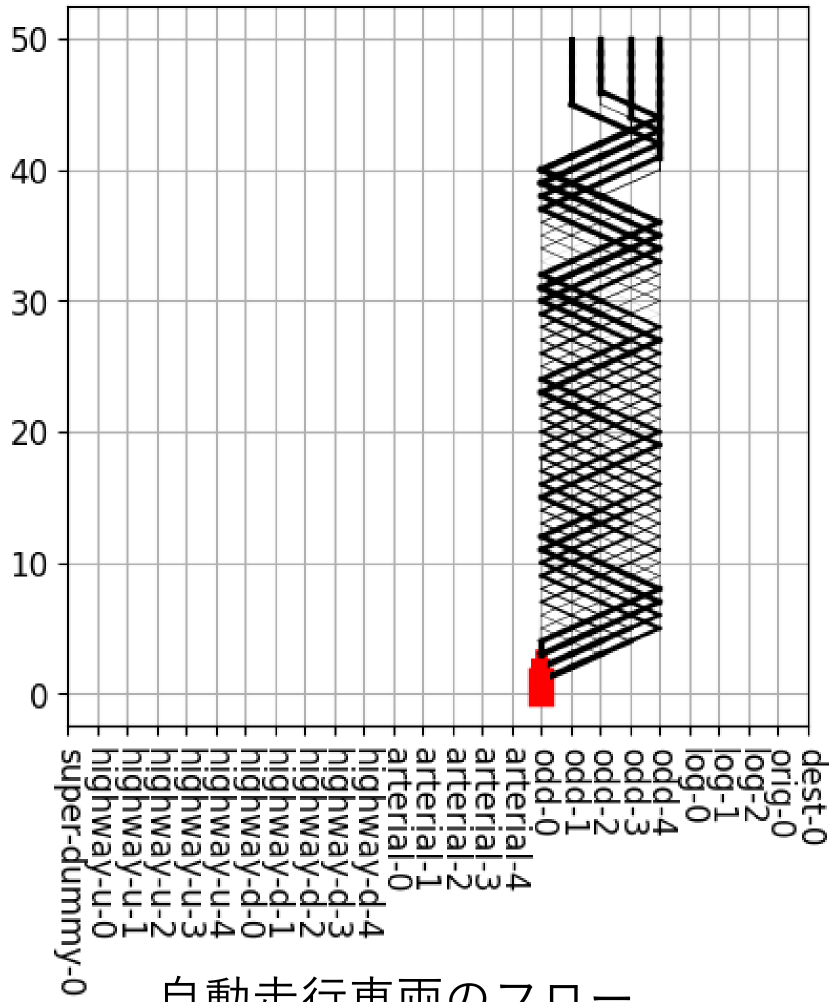
数値例



貨物のフロー



有人車両のフロー



自動走行車両のフロー

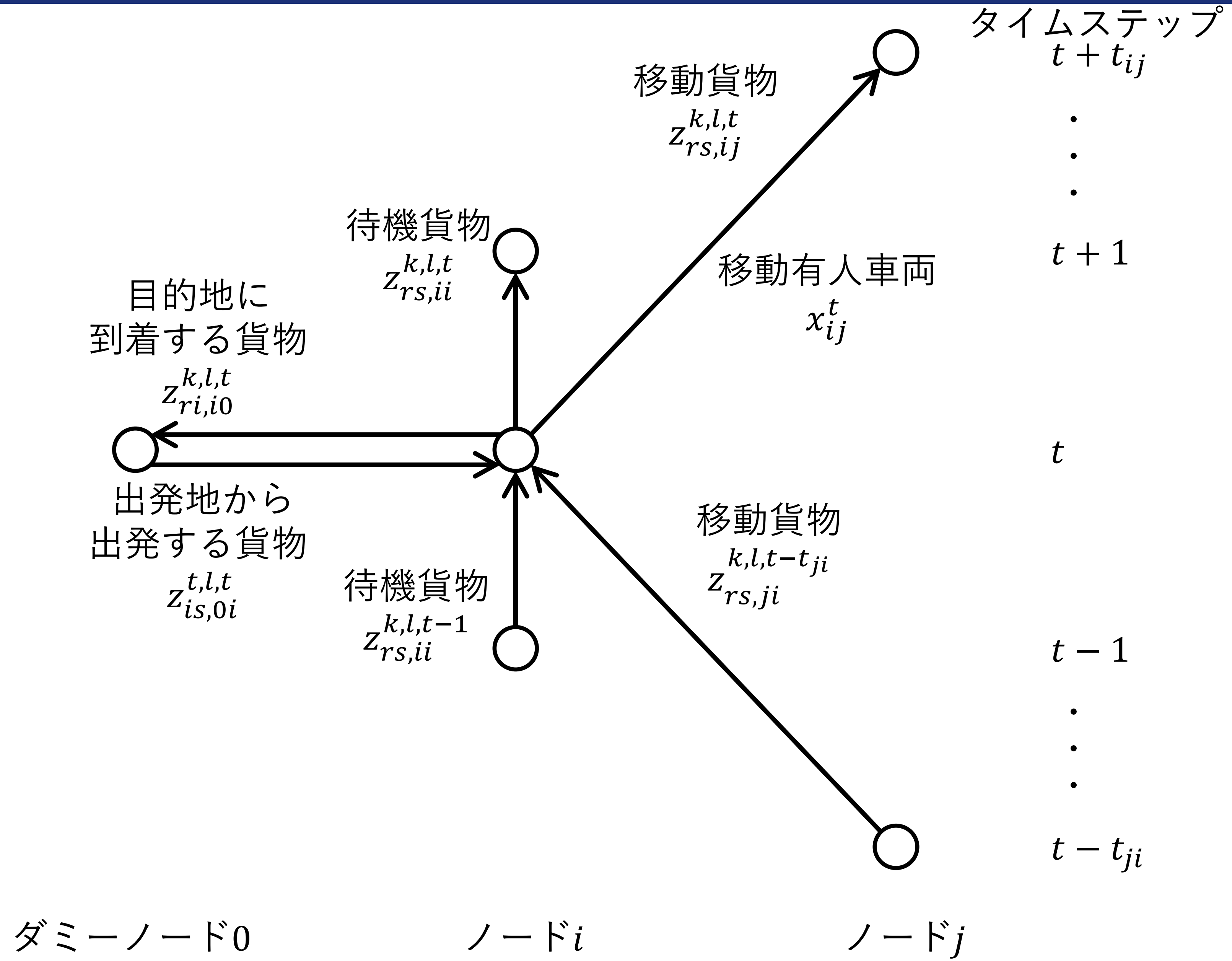
- それぞれの移動体のフロー

まとめ

- 自動走行物流システムを対象に，その物流拠点設計，車両と貨物の動的な輸送スケジュール，動的な料金設計の最適化問題を定式化

- 理論的知見
  - 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
  - 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賄える

- 今後の展開
  - 高速道路上での貨物の貯留の明示的考慮 → 単純な拡張で可能
  - 高速道路の自動走行専用車線の規模・位置を決定する問題 → 単純な拡張で可能
  - 列車を利用した物流システムの組込み → 整数計画問題の組込みで可能
  - 現実的なシナリオでのケーススタディ



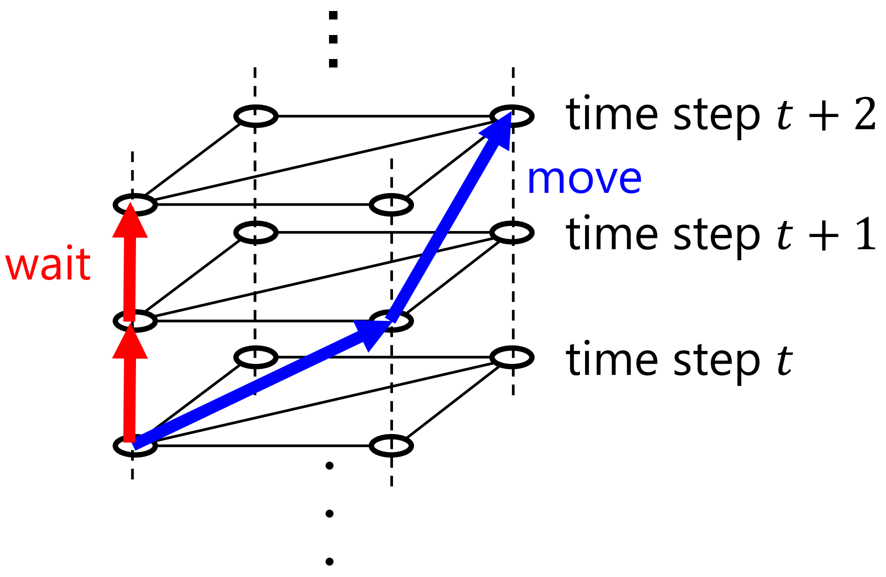
x_{ij}^{t}　時刻 t のリンク ij の有人車両移動台数

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

$x_{ij}^{t} \leq$ 交通容量

$\sum_{rs,k,l} z_{rs,ij}^{k,l,t} \leq x_{ij}^{t} \times$ 積載量



時空間拡張ネットワーク

付録：最適化問題

$$\min \alpha_X X + \alpha_Y Y + \alpha_N N + \alpha_M M + \alpha_C C + \alpha_G G \tag{1a}$$

subject to

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

$$Y = \sum_{ij,t} d_{ij} y_{ij}^t \tag{1c}$$

$$N = \sum_{i} x_{0i}^0 \tag{1d}$$

$$M = \sum_{i} y_{0i}^0 \tag{1e}$$

$$C = \sum_{ij} c_{ij} \gamma_{ij} \tag{1f}$$

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

$$\sum_j x_{ji}^{t-t_{ji}} - \sum_j x_{ij}^t = 0 \qquad \forall t, i \tag{1h}$$

$$\sum_j y_{ji}^{t-t_{ji}} - \sum_j y_{ij}^t = 0 \qquad \forall t, i \tag{1i}$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\sum_{t \in \mathcal{T}_l} z_{rs,s0}^{k,l,t} = f_{rs}^{k,l} \qquad \forall r, s, k, l \tag{1q}$$

$$0 \leq \gamma_{ij} \leq \gamma_{ij}^{\max} \qquad \forall ij \tag{1r}$$

$$z_{rs,ij}^{k,l,t} \geq 0 \qquad \forall t, ij, rs, k, l \tag{1s}$$

$$x_{ij}^t \geq 0 \qquad \forall t, ij \tag{1t}$$

$$y_{ij}^t \geq 0 \qquad \forall t, ij \tag{1u}$$

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

付録：最適性条件（一部）

有人車両のノード保存則から

道路の交通容量制約から

貨物の積載量制約から

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

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

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

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