

Scheduled Service Network Design for Freight Rail Transportation

Ahuja RK, Cunha CB, Sahin G (2005) Network models in railroad planning and scheduling. *Tutorials in Operations Research* (INFORMS, Catonsville, MD), 54–101.

理論談話会 #18

2023年6月19日(月)

交通・都市・国土学研究室

修士1年 須藤旺大

【研究のサマリー】

混載型の鉄道貨物輸送の要素を包括した多レイヤ時空間ネットワークを導入し、最適な鉄道貨物輸送の運行計画を求めるモデルを構築した。
さらに、効率的なアルゴリズムも開発した。

【良かった点】

混載型の鉄道貨物輸送の要素が多くある中で、全てを説明しようと試みている。

【課題点】

(発表者の知識不足も否めないが、)
後半のアルゴリズムとその検証に関する説明が抽象的で分かりにくかった。
より具体例な説明が欲しかった。

【新規性】

混載型の鉄道貨物輸送の要素のうち、一部分に絞ってモデルを構築している。
先行研究が多い中で、多くの要素を含んだモデルを構築している。

【有用度】

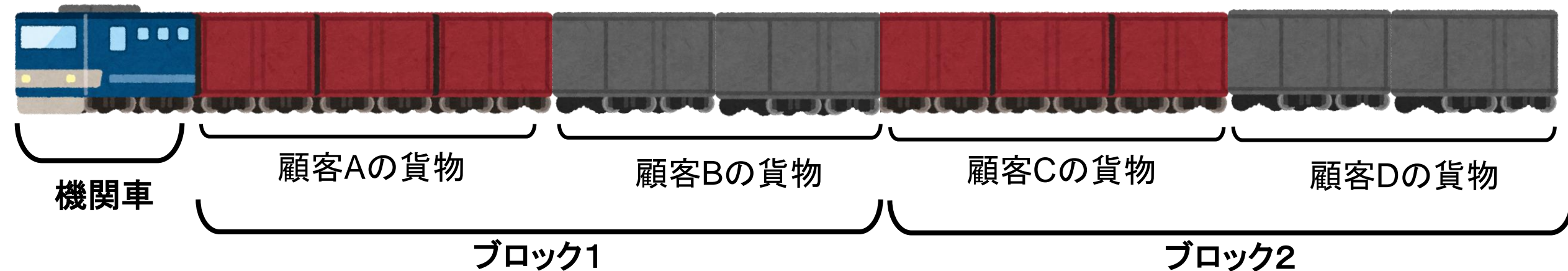
構築したモデルの効率的な解法を提案しており、実用性がある。

【信頼性】

提案した解法によるシミュレーション結果の最適性も検証している。

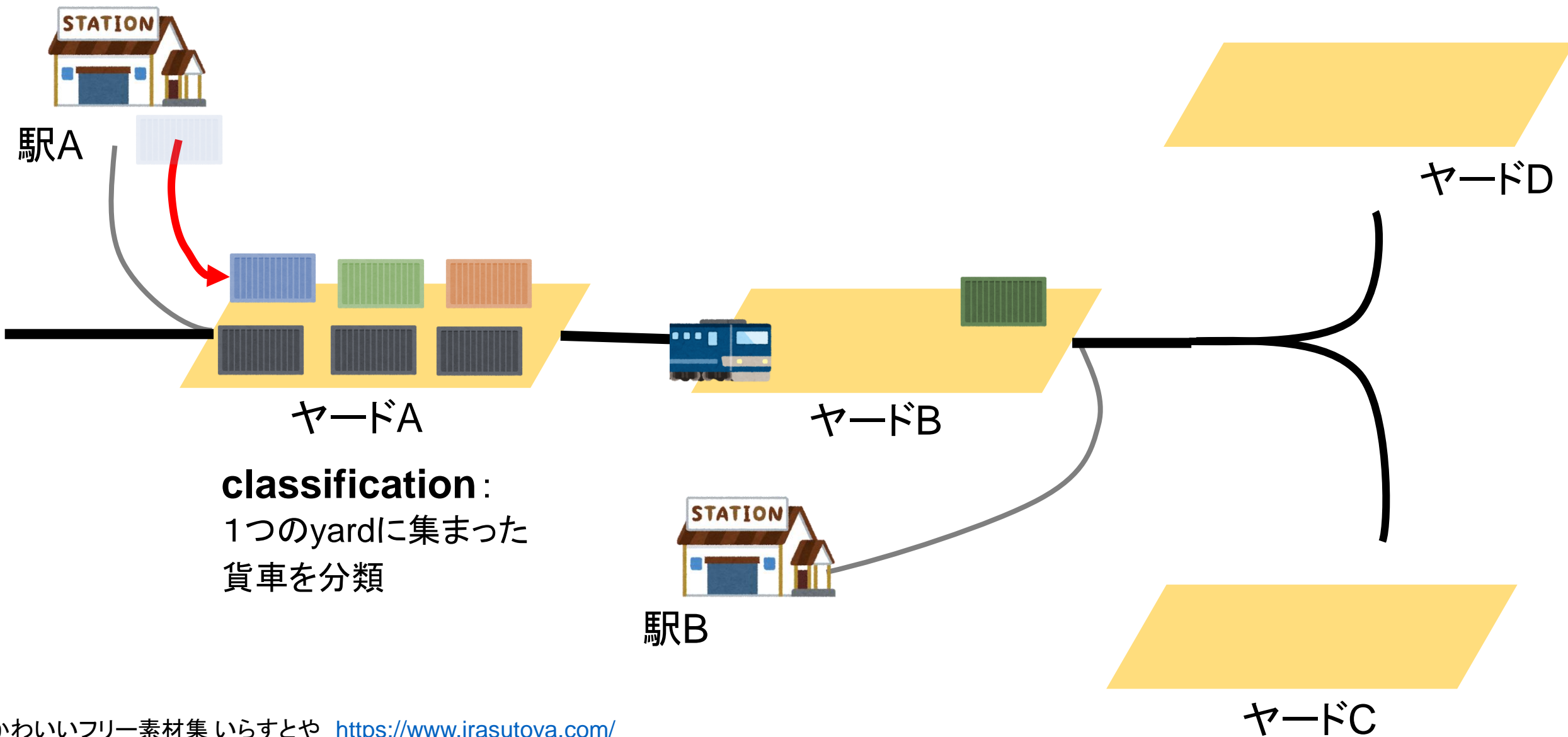
混載型の鉄道貨物輸送

異なる送り主(発着地も異なる)からの貨物を、
長距離輸送を効率的に行うために、1つの機関車に載せて輸送する

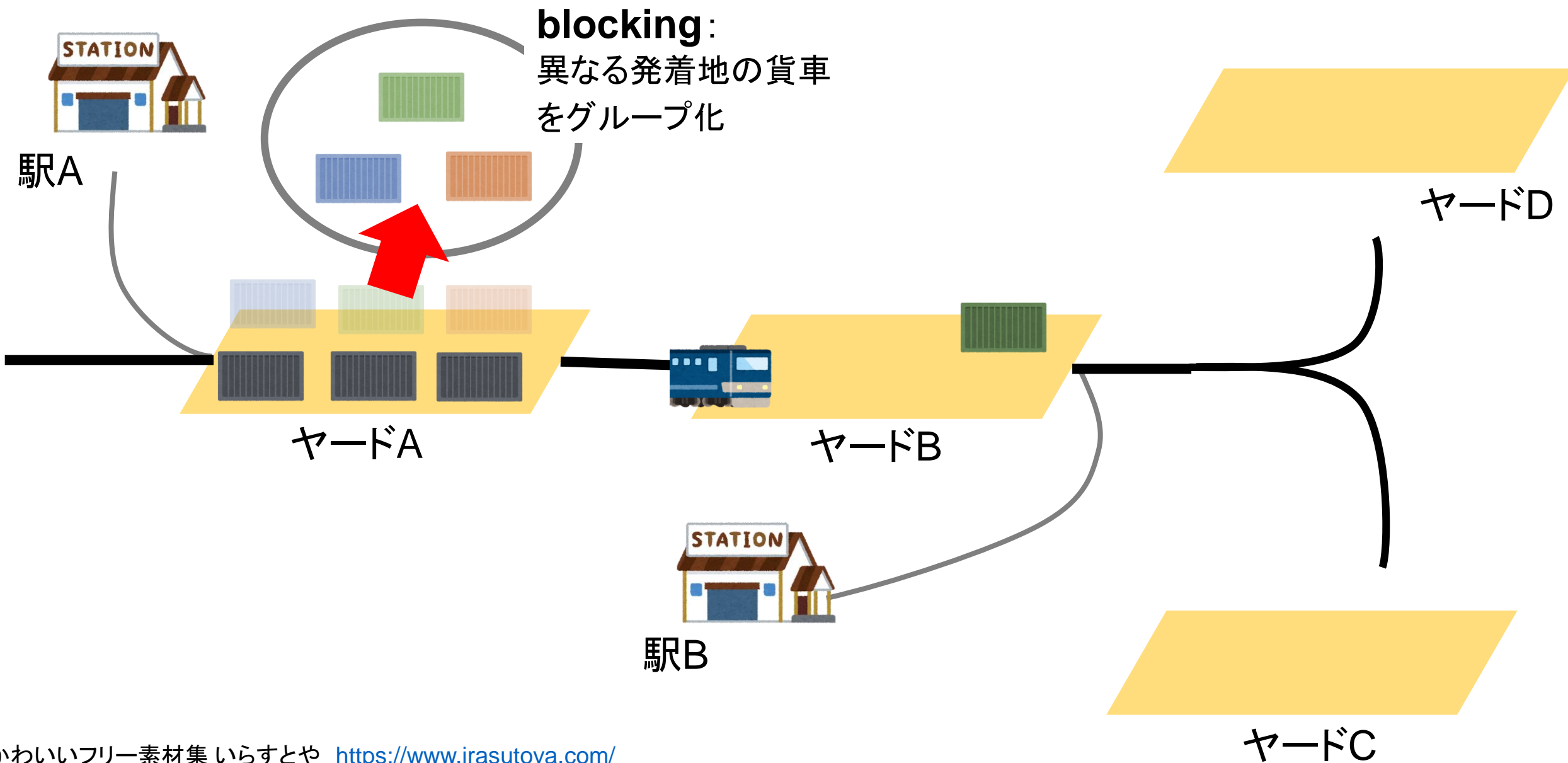


鉄道貨物事業者が設備を効率よく使い、
経済的かつ顧客サービスを満足する輸送計画を立てる上で、
サービス・ネットワーク設計問題に取り組むことが重要である

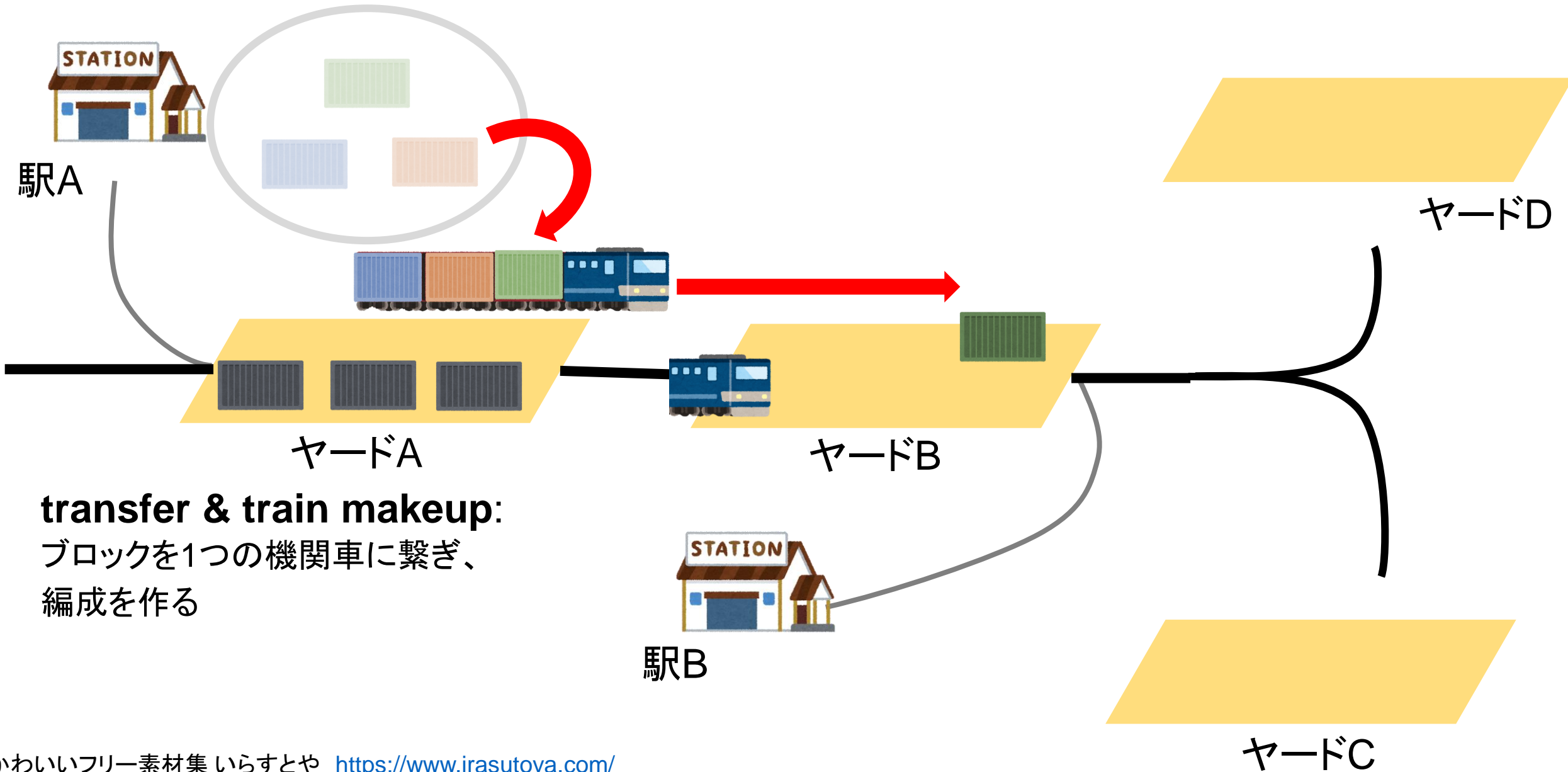
1.1 混載型の鉄道貨物輸送の要素



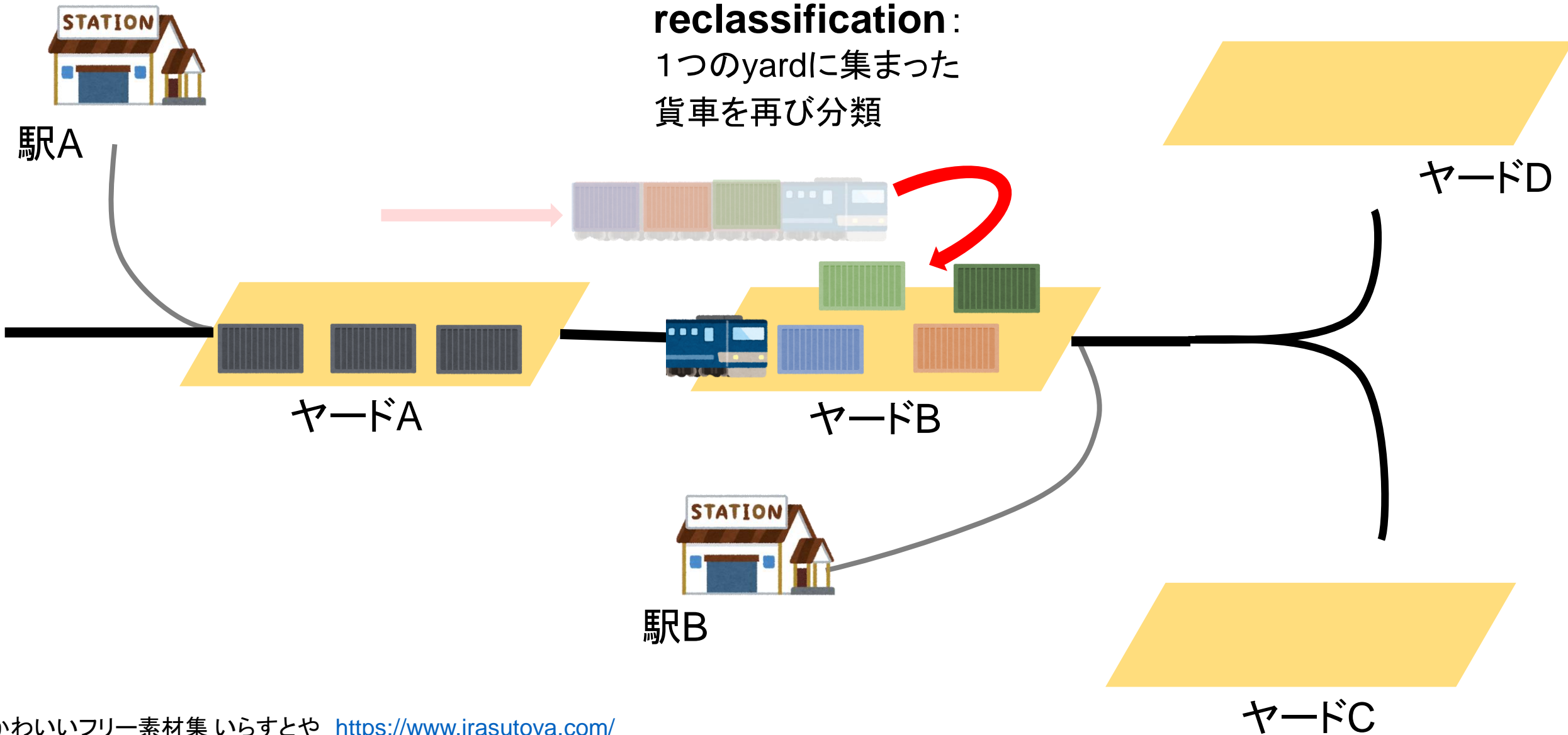
1.1 混載型の鉄道貨物輸送の要素



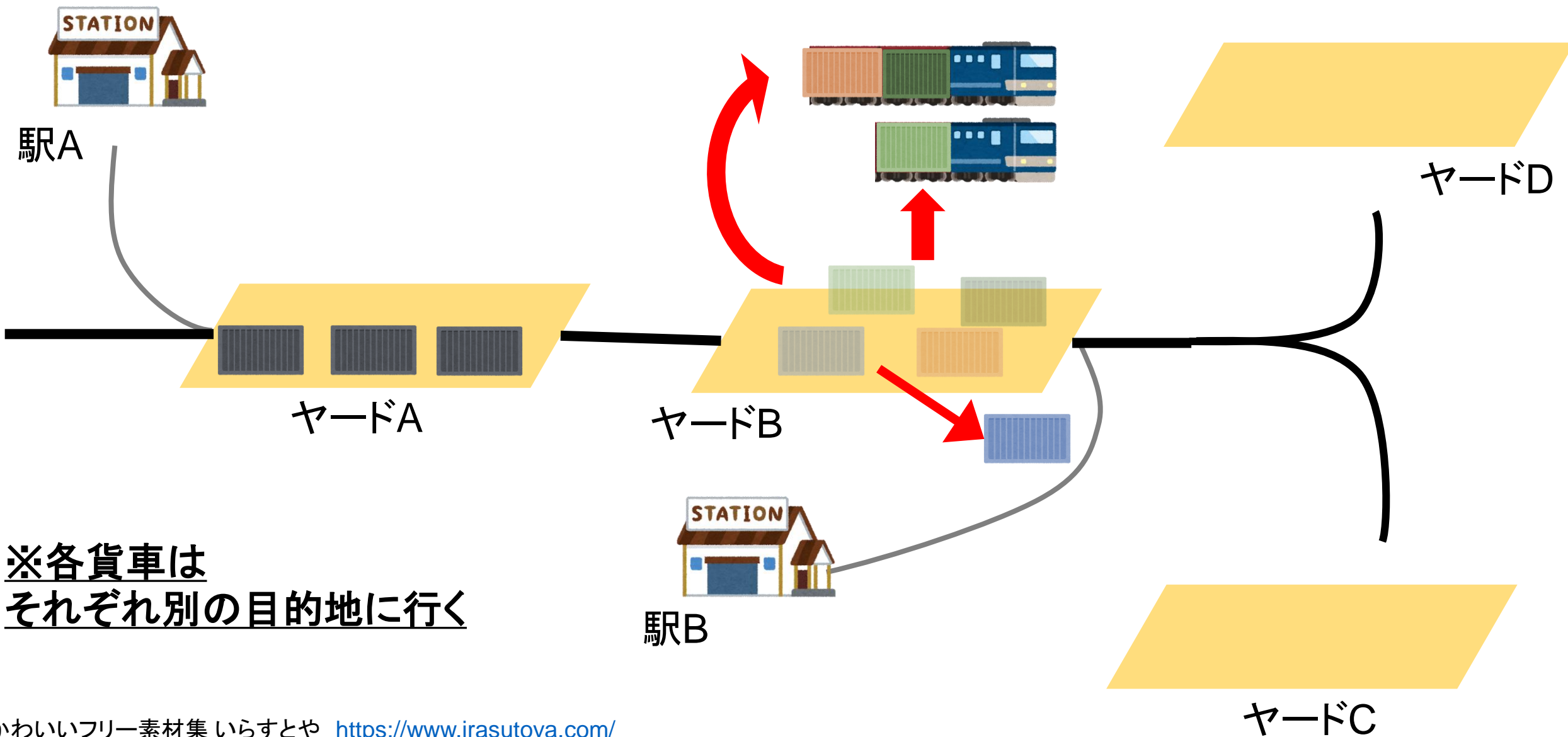
1.1 混載型の鉄道貨物輸送の要素



1.1 混載型の鉄道貨物輸送の要素

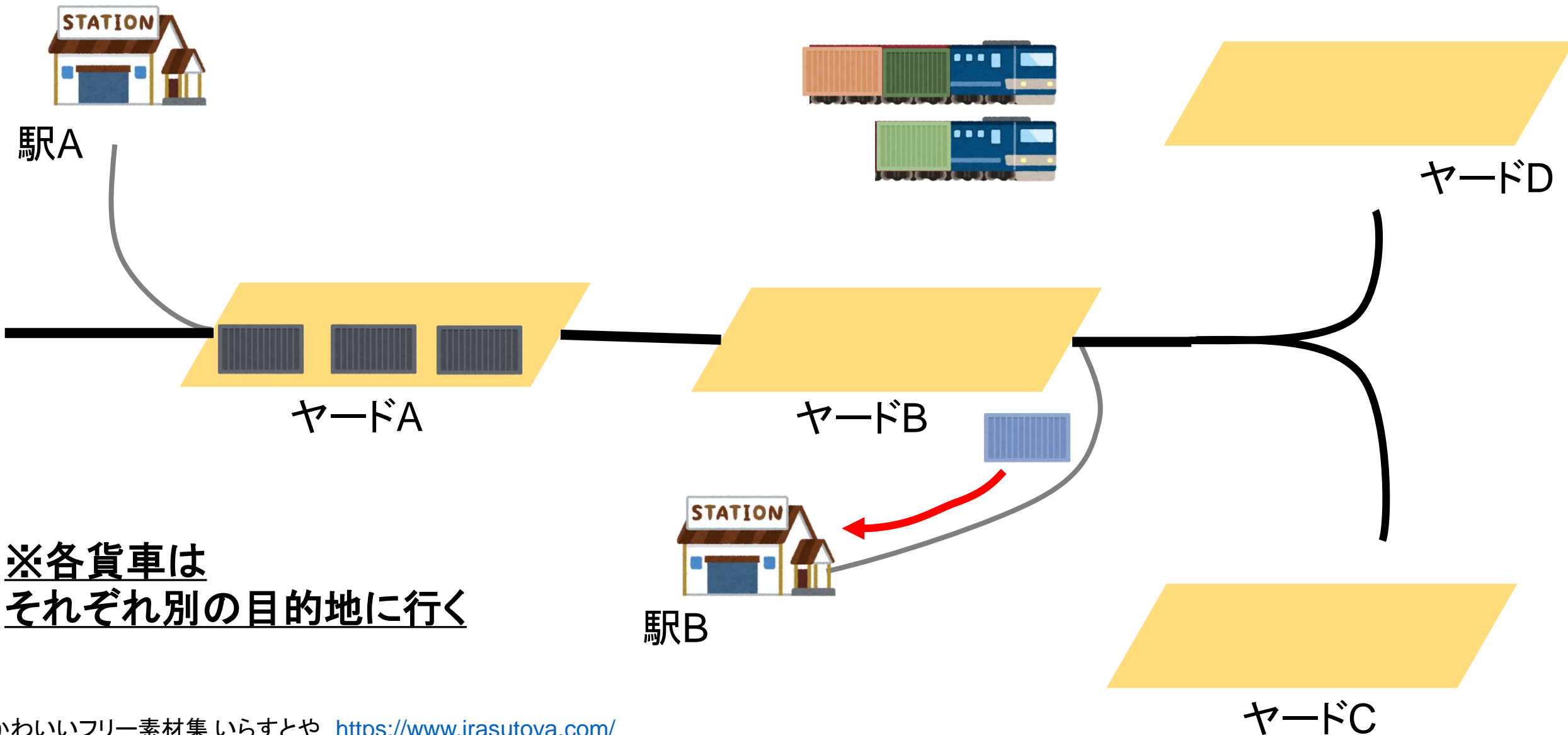


1.1 混載型の鉄道貨物輸送の要素



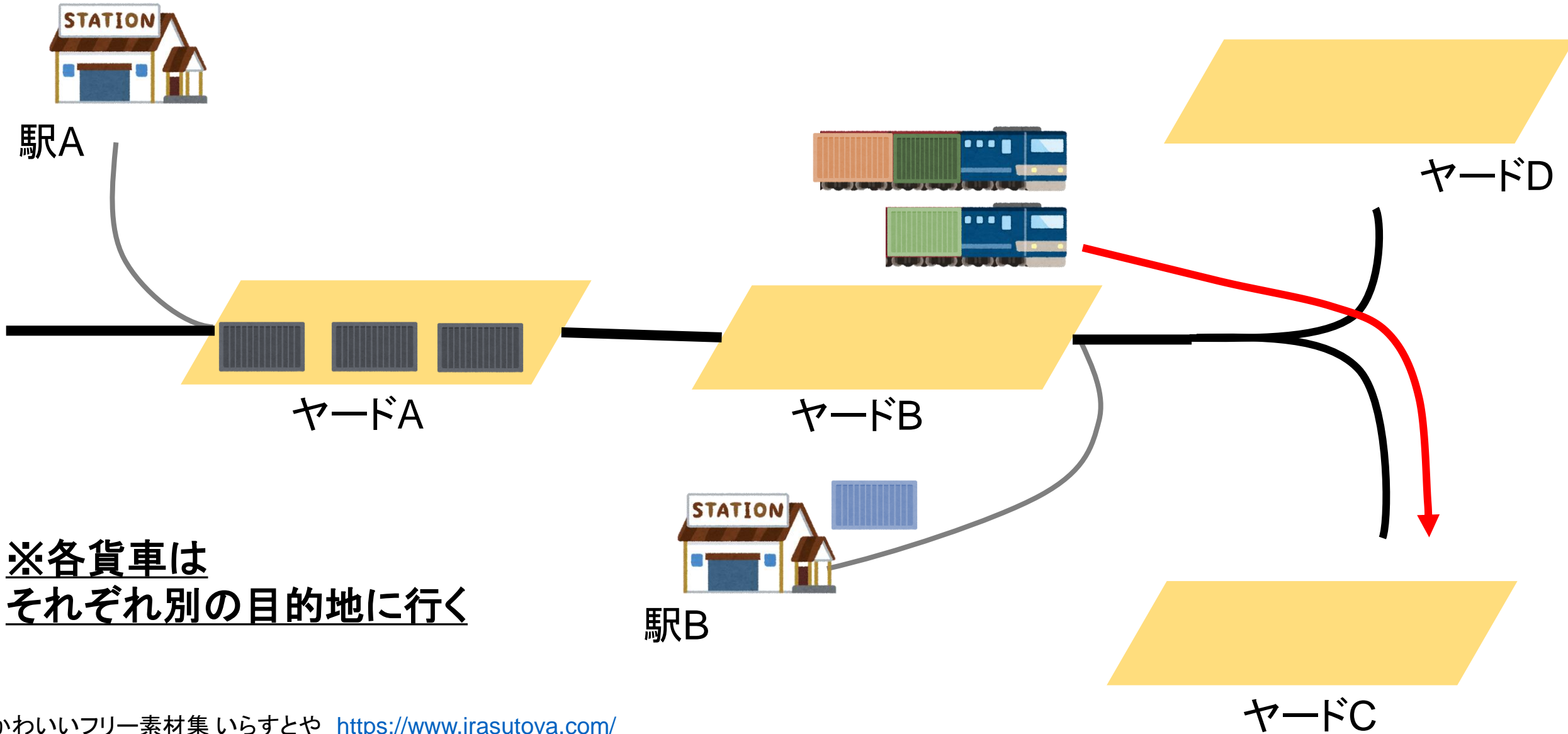
**※各貨車は
それぞれ別の目的地に行く**

1.1 混載型の鉄道貨物輸送の要素

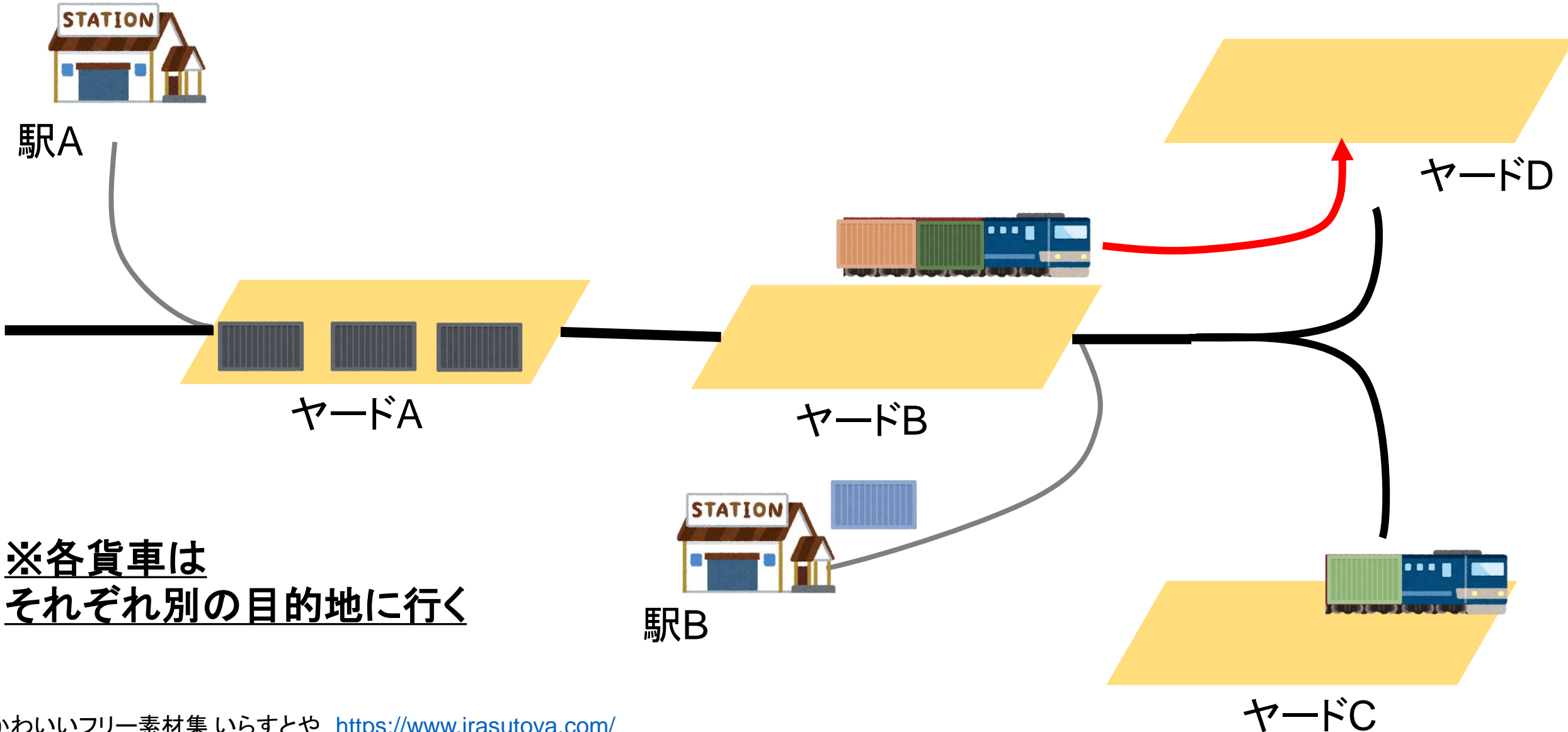


※各貨車はそれぞれ別の目的地に行く

1.1 混載型の鉄道貨物輸送の要素

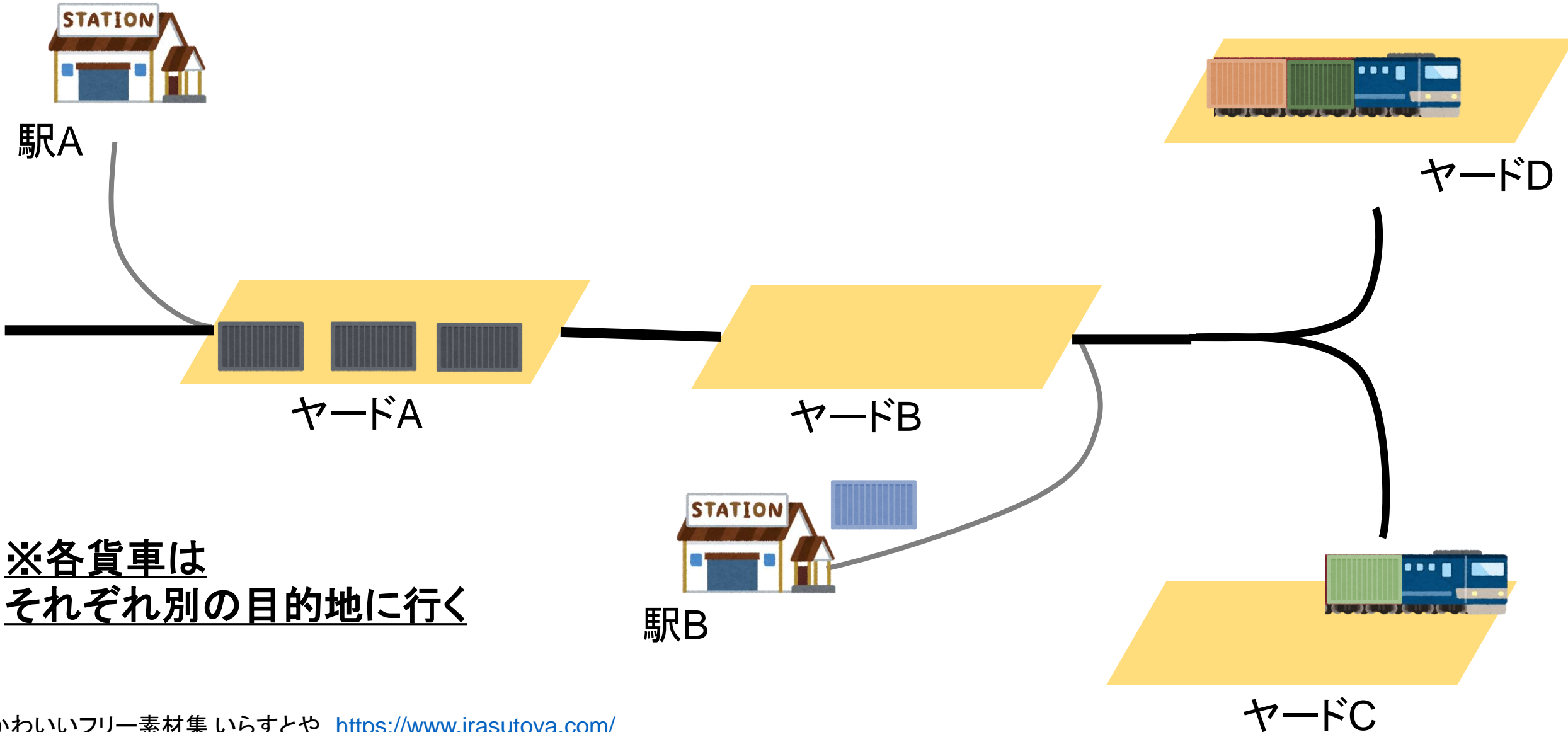


1.1 混載型の鉄道貨物輸送の要素



※各貨車はそれぞれ別の目的地に行く

1.1 混載型の鉄道貨物輸送の要素



1.1 混載型の鉄道貨物輸送の要素

貨物列車の 要素

service selection: $\left\{ \begin{array}{l} \text{経路 (起点・終点、通過するヤード、...) } \\ \text{車両のタイプ (速度、容量、...) } \end{array} \right.$

scheduling: 一定期間にどのくらいの頻度で輸送するか？

貨物そのものの 要素

blocking: 異なる発着地の貨車を1つのブロックとして、グループ化
→グループ化する基準が必要

train makeup: ブロックを機関車に積んで、列車1編成を作成
→どのヤードでブロックを降ろすかが決まる

freight routing: 貨物を始点から終点まで運ぶときの経路

混載型の鉄道貨物輸送に関する研究

著者	作成したモデルの特徴	モデルの難点
Assad (1980)	列車の経路&編成の作成を記述	ブロッキングについて考慮されていない
Morlok and Peterson (1970)	列車の経路&運行スケジュールを記述	
Newton et al. (1998) and Barnhart et al. (2000)	ブロッキングをネットワーク問題として記述	ブロッキングを鉄道サービスから分離して考慮している
Crainic and Rousseau(1986)	列車サービスとブロッキングを同時に記述	「静的」なモデル(列車が等間隔で運行されるという前提)、ブロッキングの作業を直接表す変数が無い

先行研究は問題を単純化しているか、問題の一部のみしか考慮していない

鉄道貨物輸送に関わる全ての要素を取り入れた、
総合的なサービス・ネットワーク設計の手法を構築する

1. 戦略的な輸送計画の決定に寄与する包括的なモデルの作成
2. 大規模な混合整数計画問題に対応できる解法の構築

一般的なサービス・ネットワーク設計やマルチレイヤ設計に応用可能！

3.1 論文の流れ

目的: 鉄道貨物輸送に関わる全ての要素を取り入れた、
総合的なサービス・ネットワーク設計の手法を構築する

3レイヤーの時空間 ネットワークの導入

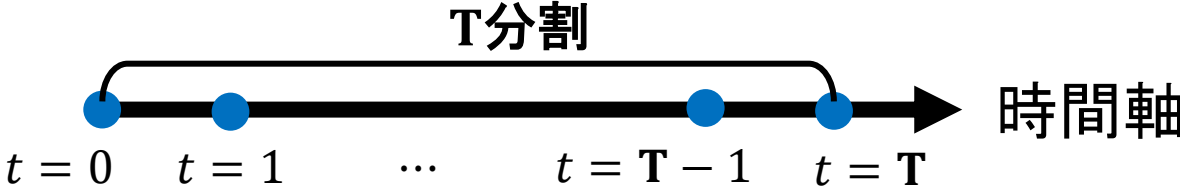
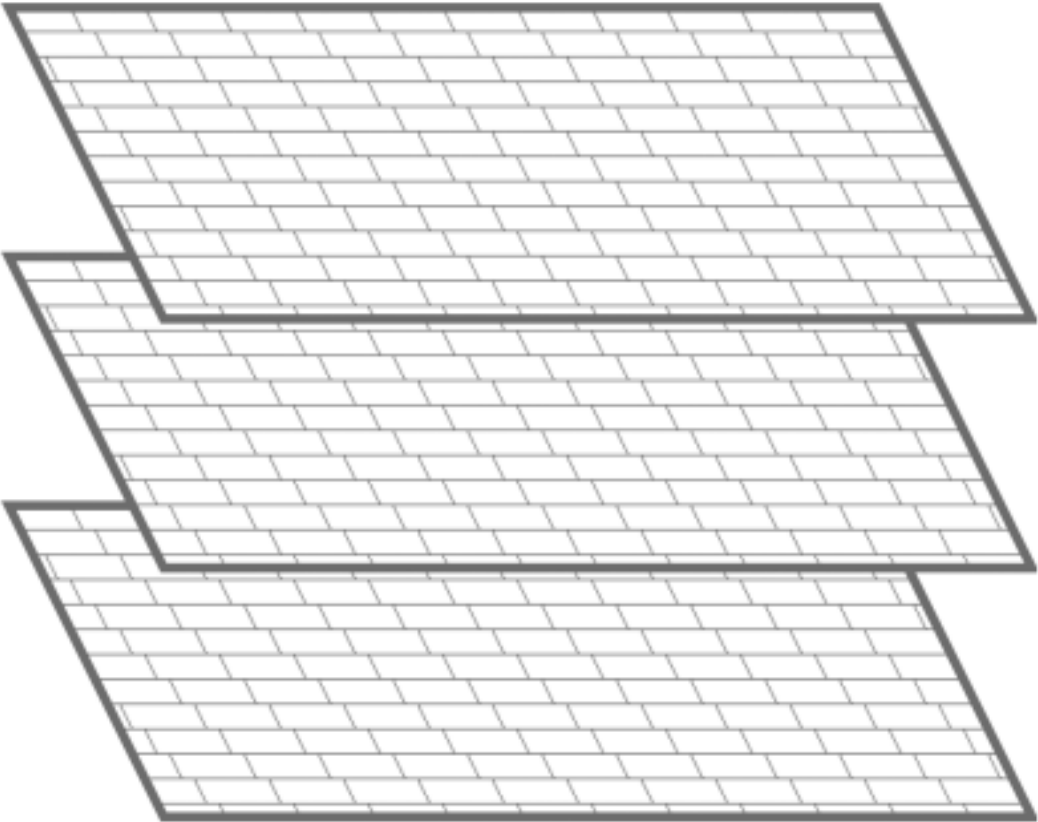
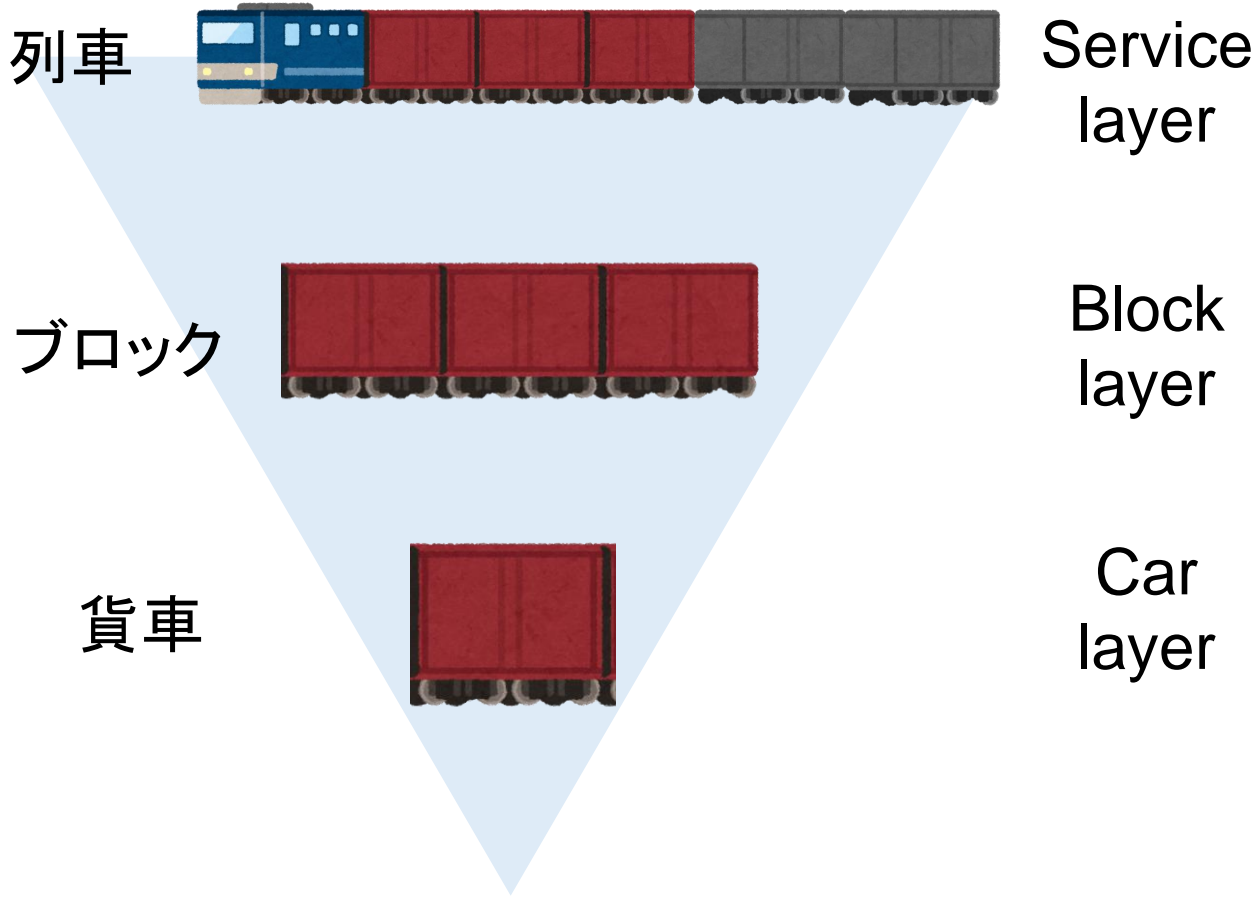
- ・サービスレイヤー
- ・ブロックレイヤー
- ・カーレイヤー

→ 混合整数計画問題
による定式化

→ アルゴリズムの
導入

→ 数値実験

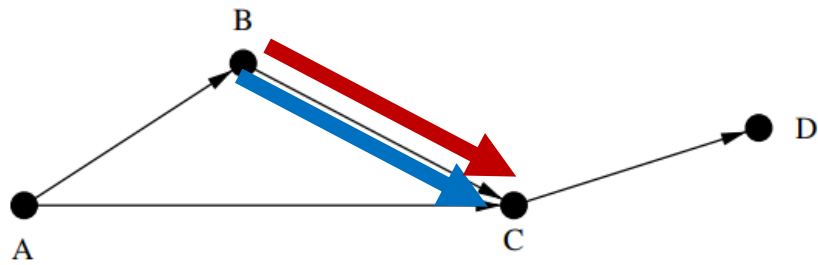
Figure 1. Three-layer space-time network structure.



4.1 Service Layer

Figure 3. Service layer.

Figure 2. A simple rail network.



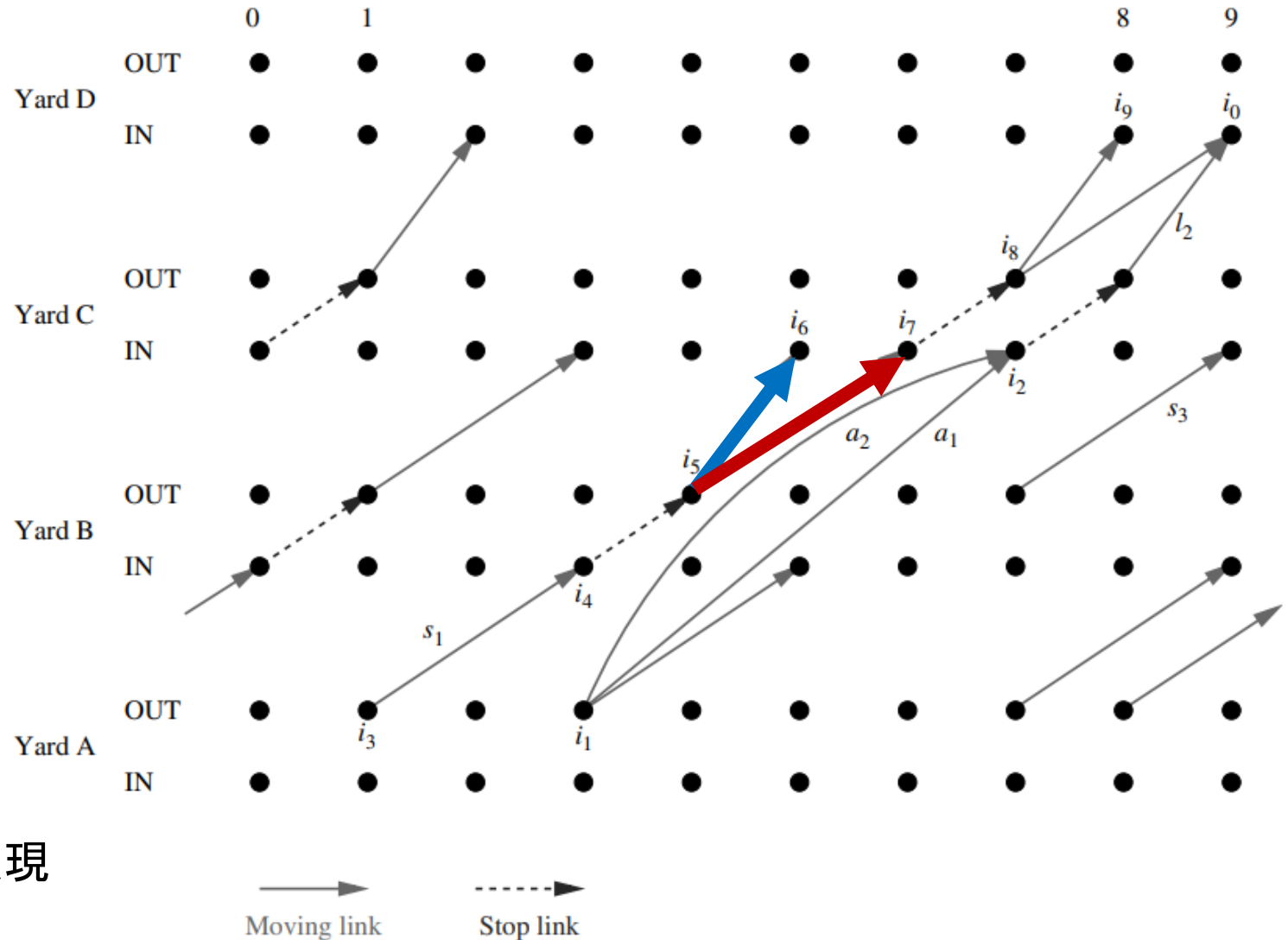
moving link $a \in \mathcal{A}^{SM}$

(OUTノード→INノード)

異なるヤードへの列車の移動を表現

例1: yard B から yard Cへ、

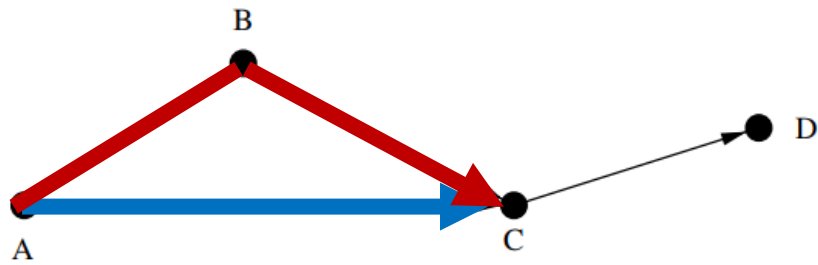
同時発車かつ全く同じ経路での運転を表現



4.1 Service Layer

Figure 3. Service layer.

Figure 2. A simple rail network.

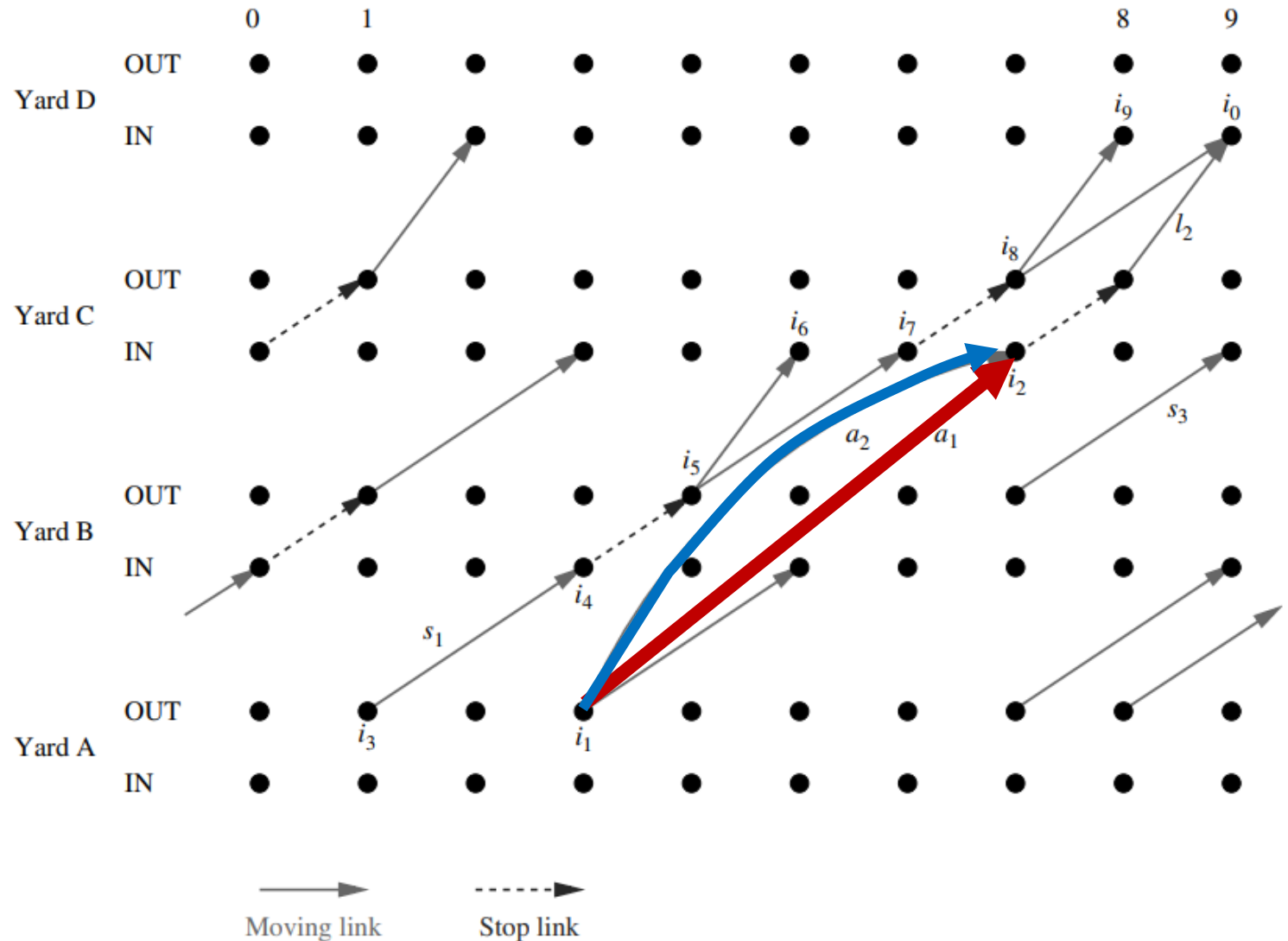


moving link $a \in \mathcal{A}^{SM}$

(OUTノード→INノード)

異なるヤードへの列車の移動を表現

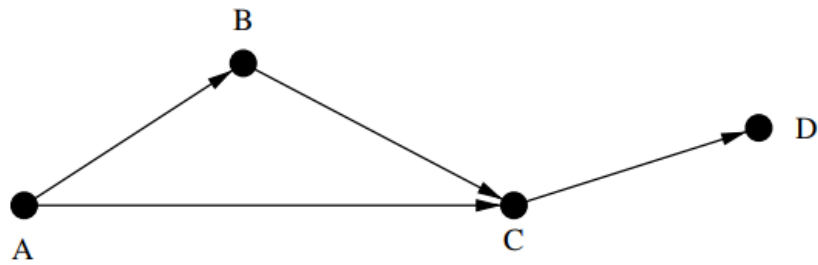
例2: yard A から yard Cへ、異なる経路での運転を表現



4.1 Service Layer

Figure 3. Service layer.

Figure 2. A simple rail network.

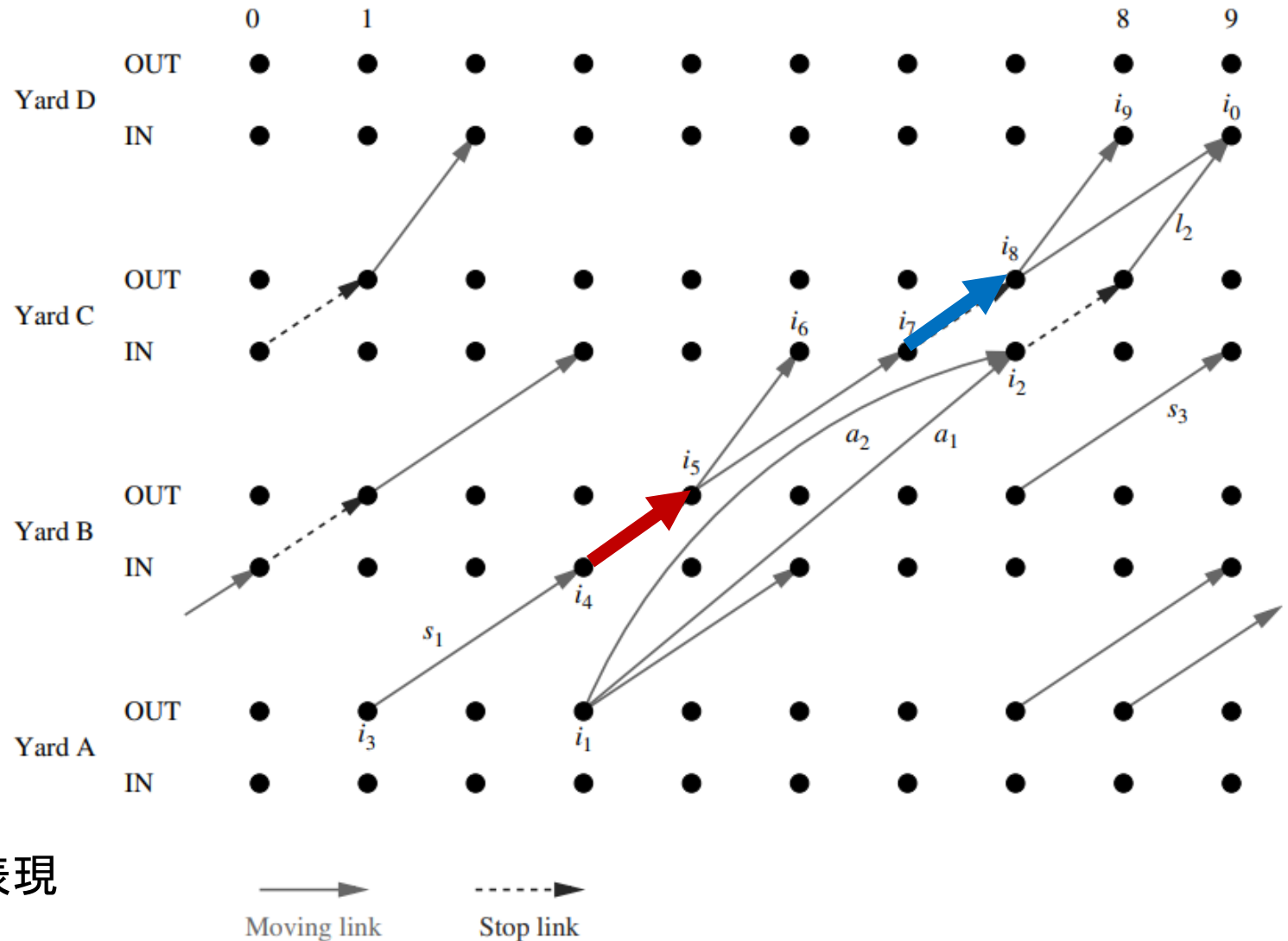


stopping link $a \in \mathcal{A}^{SR}$

(INノード→OUTノード)
 ヤード内での列車の停車
 (貨物の積み下ろし)を表現

例3:

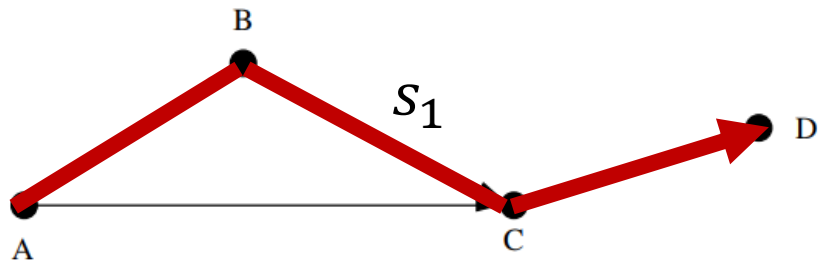
- ➡ は $t = 3 \sim 4$ 間の yard B内での停車、
- ➡ は $t = 6 \sim 7$ 間の yard C内での停車を表現



4.1 Service Layer

Figure 3. Service layer.

Figure 2. A simple rail network.

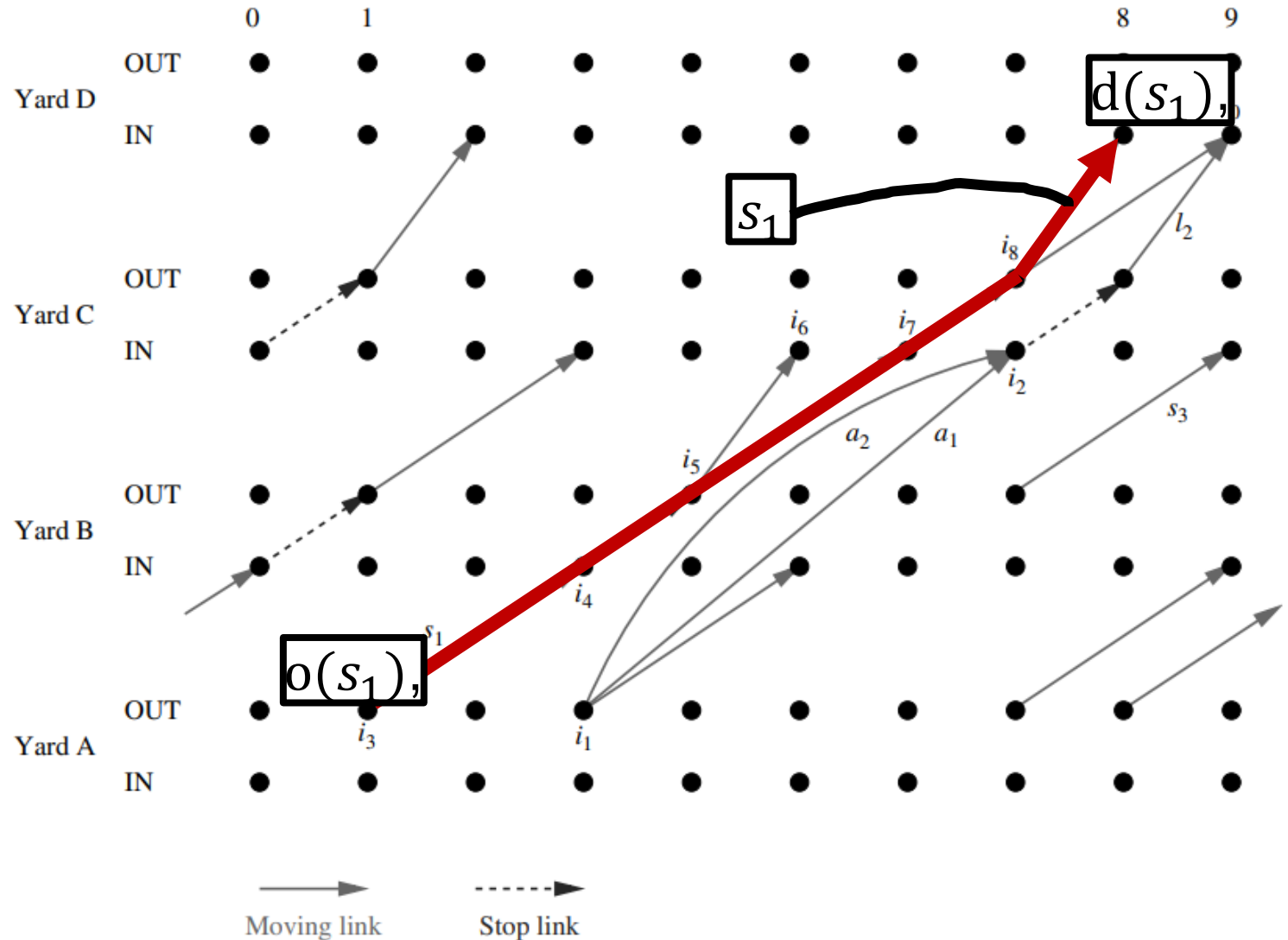


service $s \in \mathcal{S}$
 (始点: $o(s)$, 終点: $d(s)$)

列車の一連の走行を表現

例4:

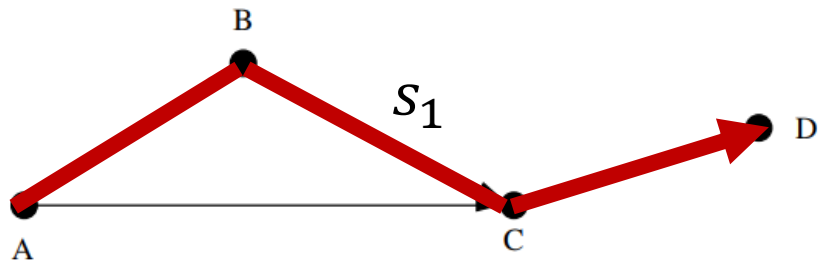
サービス s_1 は、yard A~D間を yard B、yard C に停車しつつ走行することを表現



4.1 Service Layer

Figure 3. Service layer.

Figure 2. A simple rail network.

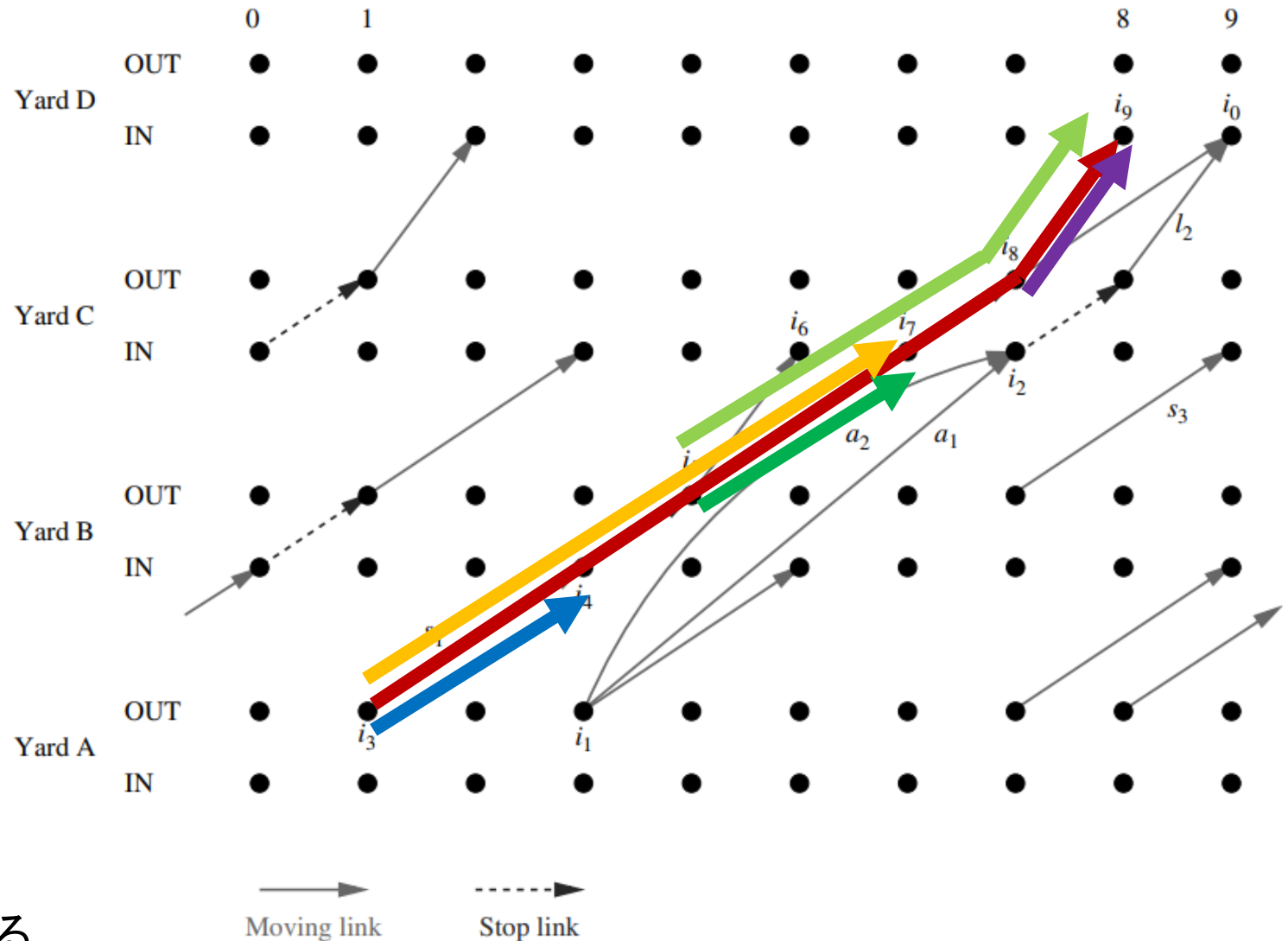


service section $l \in \mathcal{L}(s)$
 (始点: $o(l)$, 終点: $d(l)$)

サービス s を複数リンクに分割し、
 どのyard間を結ぶ役割を持つかを表す

例5: サービス s_1 は、

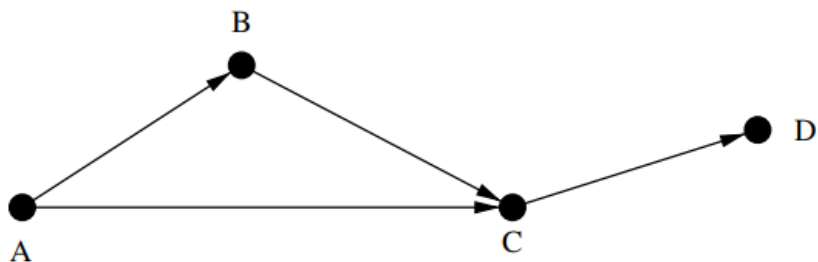
- yard A~B間、 → yard B~C間、
- yard C~D間、 → yard A~C間、
- yard B~D間、 → yard A~D間を移動する



4.2 Block Layer

Figure 4. Block layer.

Figure 2. A simple rail network.



transfer link $a \in \mathcal{A}^{BT}$

異なる列車間での
ブロックの付け替え作業を表現

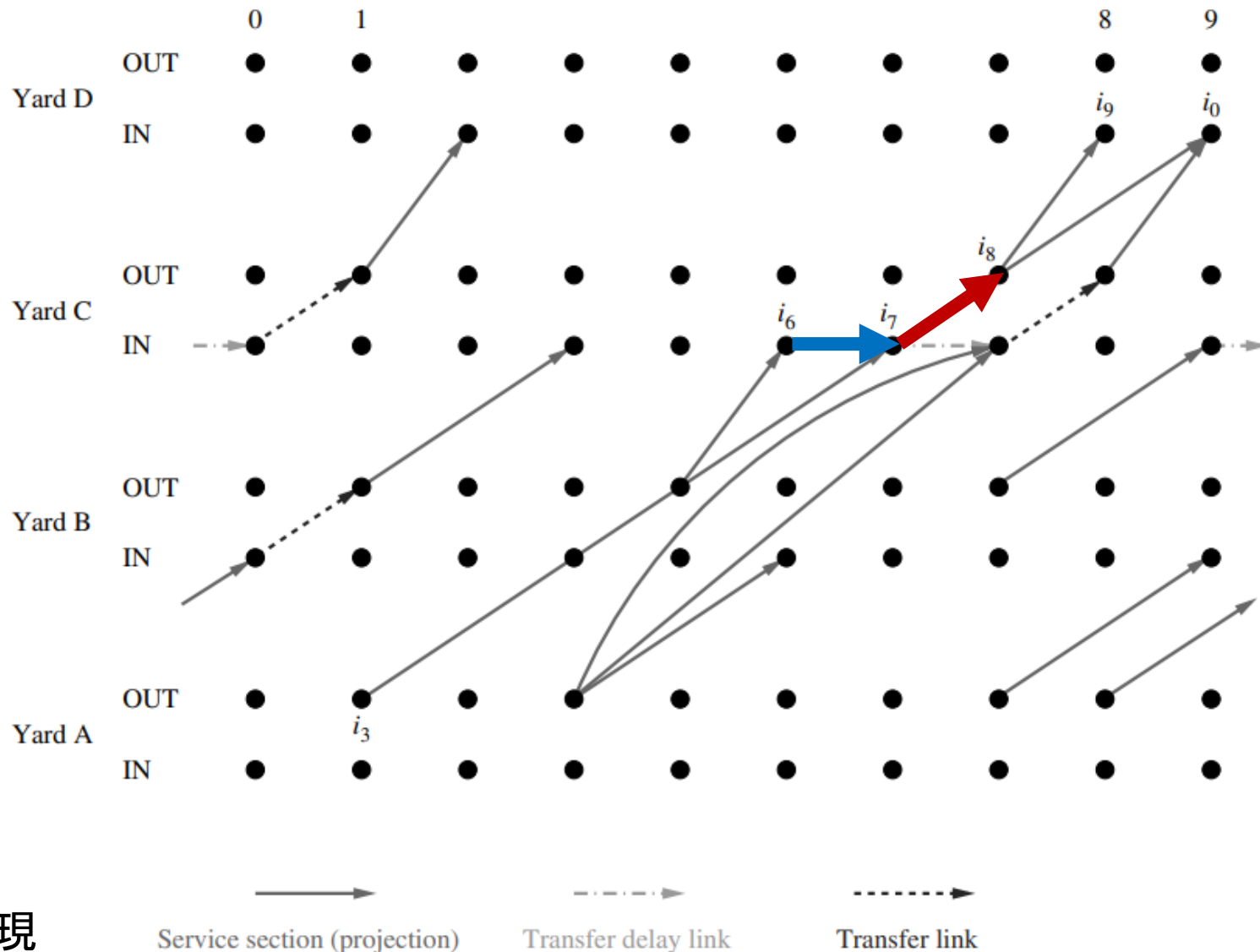
transfer-delay link $a \in \mathcal{A}^{BH}$

その他ブロック作業を表現

例1: yard C内で、

➡は停車ブロックの付け替え作業、

➡は停車ブロックのその他ブロック作業を表現



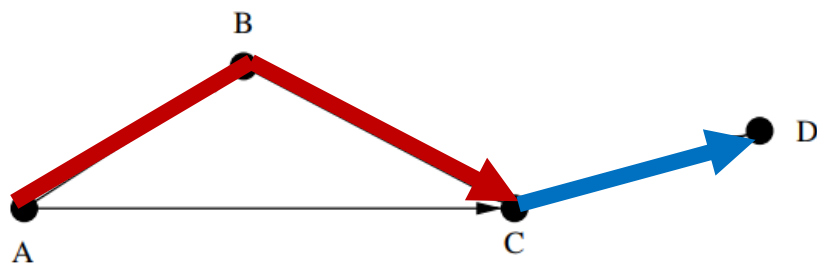
Service section (projection)

Transfer delay link

Transfer link

4.2 Block Layer

Figure 2. A simple rail network.

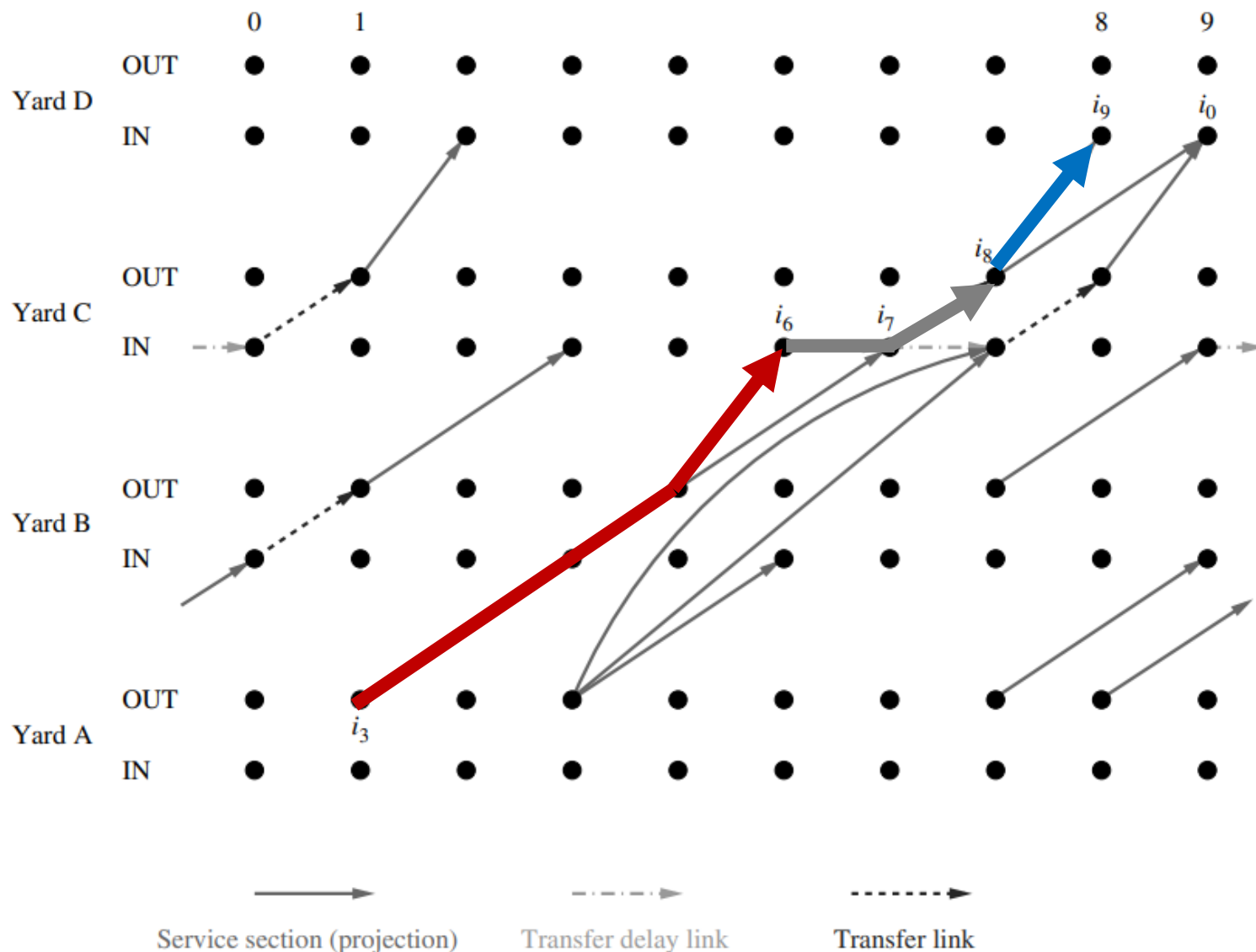


ブロック b に関する
service section $l \in \mathcal{L}(b)$

ブロック b がどのサービス(機関車)で、
yard間を輸送されるかを表す

例2: ブロック b は
yard A~C間を機関車(➡)で運ばれ、
ブロックの付け替え作業などの後、
yard C~D間を別の機関車(➡)で運ばれる

Figure 4. Block layer.



4.3 Car layer

Figure 6. Car layer.

waiting link $a \in \mathcal{A}^{CW}$

ヤードに到着した貨車が
待機する状況を表現(右図の \rightarrow)

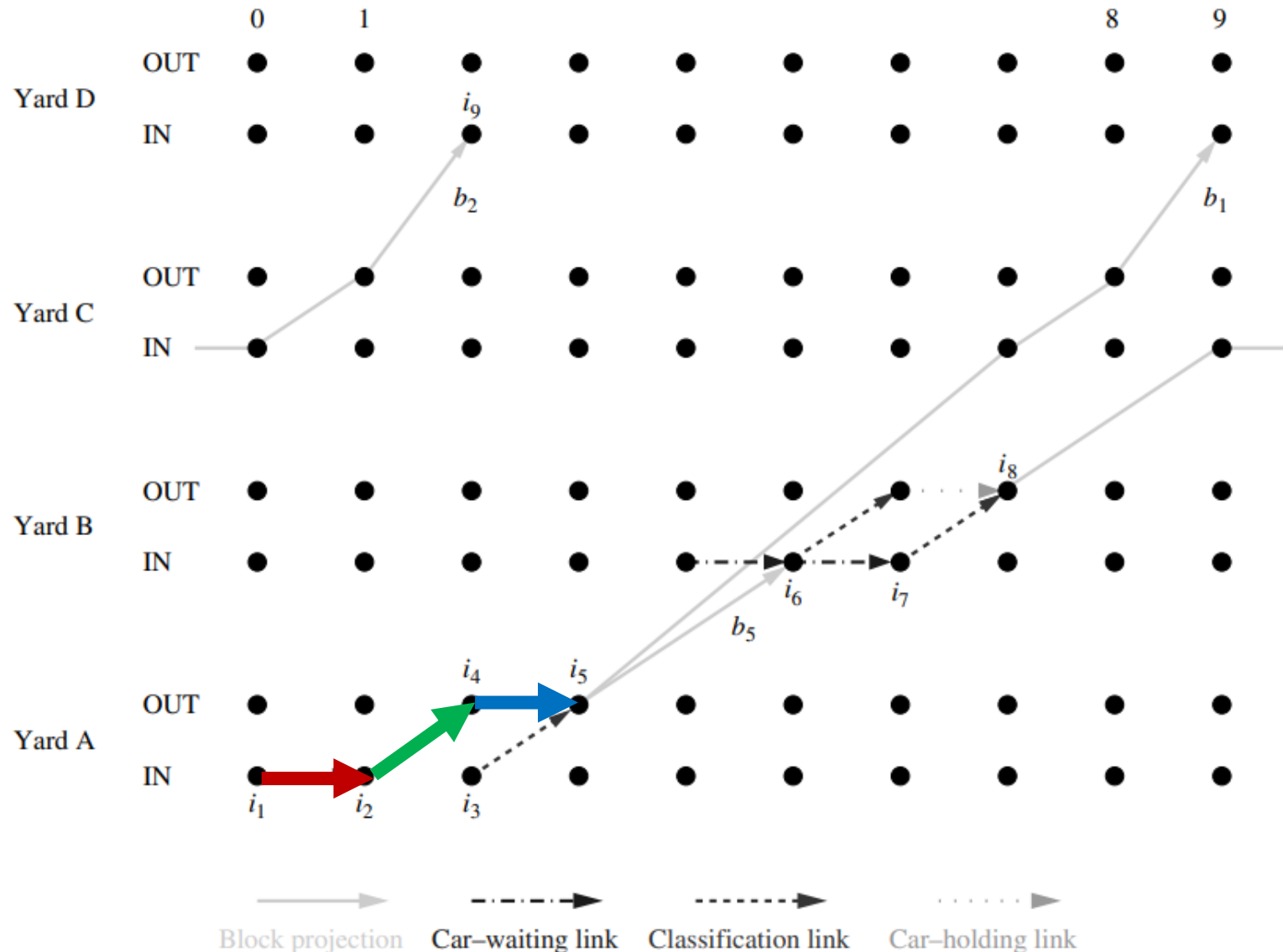
classification link $a \in \mathcal{A}^{CC}$

貨車をどのブロックにまとめるか
分類する作業(classification)が
行われている状況を表現(右図の \dashrightarrow)

holding link $a \in \mathcal{A}^{CH}$

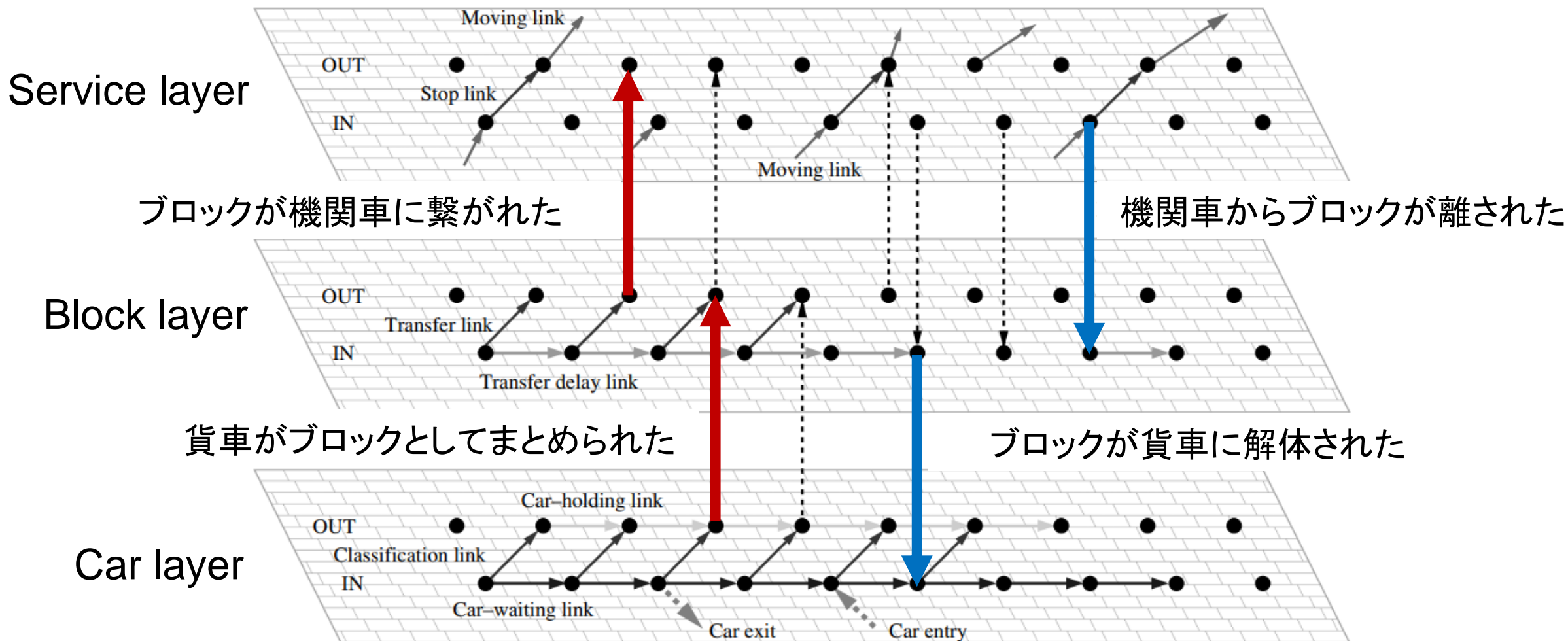
分類が終了した貨車が
ブロックとしてまとめられるのを
待機する状況を表現(右図の $\cdots\rightarrow$)

Car layer.



4.4 3レイヤの相互関係

Figure 5. Main link types of the three-layer space-time network.



3レイヤの時空間ネットワークにより、
鉄道貨物輸送に関する要素を表現した



需要に対する最適な輸送計画を求めたい



線路容量や作業量など、
実空間における物理的制約を加味して、
総費用最小化を満たす輸送計画を求める

目的
関数

$$\text{Minimize } \Phi = \sum_{s \in \mathcal{S}} c_s^F z_s + \sum_{b \in \mathcal{B}} c_b^F y_b + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{a \in \mathcal{A}} c_{ap} x_{ap} \quad (1)$$

制
約
条
件

$$\text{s.t. } \sum_{a \in \mathcal{A}^+(n)} x_{ap} - \sum_{a \in \mathcal{A}^-(n)} x_{ap} = w_n^p \quad \forall n \in \mathcal{N}^C, \forall p \in \mathcal{P}; \quad (2)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{bp} \leq y_b u_b \quad \forall b \in \mathcal{B}; \quad (3)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{asp} \leq z_s u_s \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{SM}}, s \in \mathcal{S}; \quad (4)$$

$$y_b \leq z_{s(l)} \quad \forall b \in \mathcal{B}, l \in \mathcal{L}(b); \quad (5)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{ap} \leq u_a \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{CC}}; \quad (6)$$

$$\sum_{b \in \mathcal{B}(v,t)} y_b \leq u_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \{1, \dots, \mathbf{T}\}; \quad (7)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}(e,t)} z_s \leq u_e \quad \forall e \in \mathcal{E}, \forall t \in \{1, \dots, \mathbf{T}\}; \quad (8)$$

$$x_{ap} \geq 0 \quad \forall a \in \mathcal{A}, \forall p \in \mathcal{P}; \quad (9)$$

$$y_b \in \{0, 1\} \quad \forall b \in \mathcal{B}; \quad (10)$$

$$z_s \in \{0, 1\} \quad \forall s \in \mathcal{S}. \quad (11)$$

5.1 目的関数

$$\text{Minimize } \Phi = \sum_{s \in \mathcal{S}} c_s^F z_s + \sum_{b \in \mathcal{B}} c_b^F y_b + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{a \in \mathcal{A}} c_{ap} x_{ap} \quad (1)$$

総費用 Φ を最小化する

$$c_s^F : \text{サービス } s \text{ の固定費用} \quad z_s = \begin{cases} 1 & (\text{サービス } s \text{ が選ばれた場合}) \\ 0 & (\text{サービス } s \text{ が選ばれない場合}) \end{cases} \quad \mathcal{S} : \text{サービスの集合}$$

$$c_b^F : \text{ブロック } b \text{ の固定費用} \quad y_b = \begin{cases} 1 & (\text{ブロック } b \text{ が作られた場合}) \\ 0 & (\text{ブロック } b \text{ が作られない場合}) \end{cases} \quad \mathcal{B} : \text{ブロックの集合}$$

$$c_{ap} : \text{リンク } a \text{ 上の貨物 } p \text{ の輸送にかかる貨車 1 台の固定費用} \quad \mathcal{A} : \text{リンクの集合}$$

$$x_{ap} : \text{リンク } a \text{ 上の貨物 } p \text{ の輸送に必要な貨車の台数} \quad \mathcal{P} : \text{貨物の集合}$$

5.2 制約条件

$$\sum_{a \in \mathcal{A}^+(n)} x_{ap} - \sum_{a \in \mathcal{A}^-(n)} x_{ap} = w_n^p \quad \forall n \in \mathcal{N}^C, \forall p \in \mathcal{P}; \quad (2)$$

貨車の数は不変

x_{ap} : リンク a 上の貨物 p の輸送に必要な貨車の台数

$\mathcal{A}^+(n)$: ノード n から出るリンクの集合

$\mathcal{A}^-(n)$: ノード n に入るリンクの集合

$$w_n^p = \begin{cases} w(p) & (\text{貨物 } p \text{ の起点がノード } n \text{ の場合}) \\ -w(p) & (\text{貨物 } p \text{ の終点がノード } n \text{ の場合}) \\ 0 & (\text{それ以外の場合}) \end{cases}$$

ただし、 $w(p)$ は貨物 p の貨車数

\mathcal{N}^C : Car layer のノード全集合

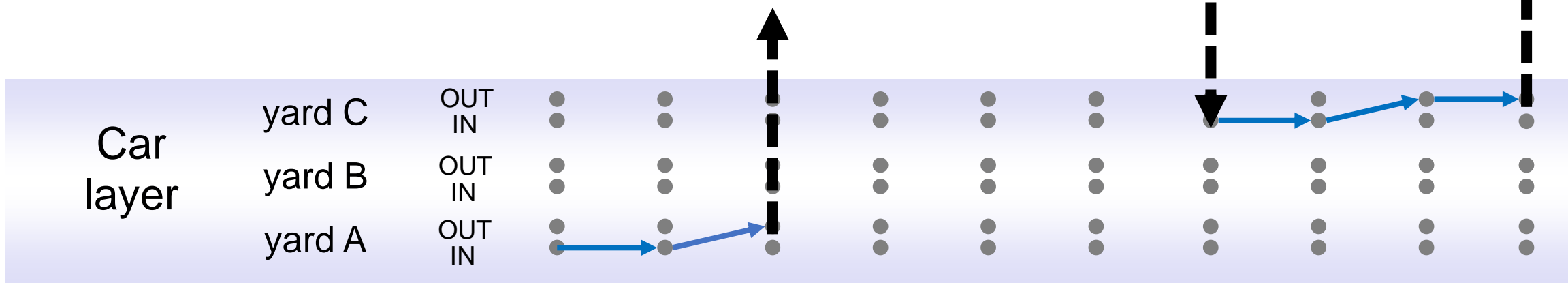
\mathcal{P} : 貨物の全集合

5.2 制約条件

$$\sum_{a \in \mathcal{A}^+(n)} x_{ap} - \sum_{a \in \mathcal{A}^-(n)} x_{ap} = w_n^p \quad \forall n \in \mathcal{N}^C, \forall p \in \mathcal{P}; \quad (2)$$

貨車の数是不変

Car layerのノードに矢印が入ったら、必ず出ていく！
 (yardが貨物の起終点となる場合を除く)



5.2 制約条件

実空間における物理的制約(線路容量、作業量など)

その1

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{bp} \leq y_b u_b \quad \forall b \in \mathcal{B}; \quad (3)$$

ブロック **b** を構成する貨車数は最大数を越えない

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{asp} \leq z_s u_s \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{SM}}, s \in \mathcal{S}; \quad (4)$$

ある区間で貨物 **p** の輸送する時の貨車数は最大数を越えない

$$y_b \leq z_{s(l)} \quad \forall b \in \mathcal{B}, l \in \mathcal{L}(b); \quad (5)$$

ブロックが輸送されれば1

列車が運行されれば1


→ある区間で列車が運行されなければ、ブロックも輸送されない

5.2 制約条件

実空間における物理的制約
(線路容量、作業量など)



その2

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{ap} \leq u_a \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{CC}}; \quad (6)$$






ヤード内で分類される貨車の長さは最大長を越えない

$$\sum_{b \in \mathcal{B}(v, t)} y_b \leq u_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \{1, \dots, \mathbf{T}\}; \quad (7)$$

ヤード v で、時間 t に作られるブロック数は最大数を越えない

$$\sum_{s \in \mathcal{S}(e, t)} z_s \leq u_e \quad \forall e \in \mathcal{E}, \forall t \in \{1, \dots, \mathbf{T}\}; \quad (8)$$

区間 e で、時間 t に運行される列車数は最大数を越えない

5.2 制約条件

設定した変数が予想外の数値を取らないことを担保

$$x_{ap} \geq 0 \quad \forall a \in \mathcal{A}, \forall p \in \mathcal{P}; \quad (9)$$

↑ リンク a 上の貨物 p の輸送に必要な貨車の台数は非負

$$y_b \in \{0, 1\} \quad \forall b \in \mathcal{B}; \quad (10)$$

↑ $y_b = \begin{cases} 1 & (\text{ブロック}b\text{が作られた場合}) \\ 0 & (\text{ブロック}b\text{が作られない場合}) \end{cases}$ 0,1以外はとらない

$$z_s \in \{0, 1\} \quad \forall s \in \mathcal{S}. \quad (11)$$

↑ $z_s = \begin{cases} 1 & (\text{サービス}s\text{が選ばれた場合}) \\ 0 & (\text{サービス}s\text{が選ばれない場合}) \end{cases}$ 0,1以外はとらない

定式化した混合整数計画問題は**NP-HARD**のため、
条件を緩和する必要あり



Basic Slope Scaling、Block-Dynamic Slope Scaling (本研究で提案)
の2手法それぞれで緩和

6.1 Basic Slope Scaling

$$\text{Minimize } \Phi = \sum_{s \in \mathcal{S}} c_s^F z_s + \sum_{b \in \mathcal{B}} c_b^F y_b + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{a \in \mathcal{A}} c_{ap} x_{ap} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{a \in \mathcal{A}^+(n)} x_{ap} - \sum_{a \in \mathcal{A}^-(n)} x_{ap} = w_n^p \quad \forall n \in \mathcal{N}^C, \forall p \in \mathcal{P}; \quad (2)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{bp} \leq y_b u_b \quad \forall b \in \mathcal{B}; \quad (3)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{asp} \leq z_s u_s \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{SM}}, s \in \mathcal{S}; \quad (4)$$

$$\underline{\underline{y_b \leq z_{s(l)} \quad \forall b \in \mathcal{B}, l \in \mathcal{L}(b); \quad (5)}}$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{ap} \leq u_a \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{CC}}; \quad (6)$$

$$\underline{\underline{\sum_{b \in \mathcal{B}(v, t)} y_b \leq u_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \{1, \dots, \mathbf{T}\}; \quad (7)}}$$

$$\underline{\underline{\sum_{s \in \mathcal{S}(e, t)} z_s \leq u_e \quad \forall e \in \mathcal{E}, \forall t \in \{1, \dots, \mathbf{T}\}; \quad (8)}}$$

ブロック作成、列車の運行に関する制約を取り除く

(y_b, z_s に関する式を消す)



代わりに α_b, β_{as} を導入し、条件を緩和



輸送パターンの \tilde{x} を求め、
作成するブロック \tilde{y} 、運行するサービス \tilde{z} を求める

※ $\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$ は現時点で暫定解

6.1 Basic Slope Scaling

$$\text{Minimize } \Phi = \sum_{s \in \mathcal{S}} c_s^F z_s + \sum_{b \in \mathcal{B}} c_b^F y_b + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{a \in \mathcal{A}} c_{ap} x_{ap} \quad (1)$$

$$\text{AP}(\alpha, \beta): \text{Minimize } \left\{ \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{a \in \mathcal{A}^{\text{SM}}} \beta_{as} x_{asp} + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \alpha_b x_{bp} + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{a \in \mathcal{A}} c_{ap} x_{ap} \right\} \quad (12)$$

$$\text{s.t. } \sum_{a \in \mathcal{A}^+(n)} x_{ap} - \sum_{a \in \mathcal{A}^-(n)} x_{ap} = w_n^p \quad \forall n \in \mathcal{N}^C, \forall p \in \mathcal{P}; \quad (2)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{bp} \leq y_b u_b \quad \forall b \in \mathcal{B}; \quad (3)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{asp} \leq z_s u_s \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{SM}}, s \in \mathcal{S}; \quad (4)$$

$$\underline{\underline{y_b \leq z_{s(l)} \quad \forall b \in \mathcal{B}, l \in \mathcal{L}(b); \quad (5)}}$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{ap} \leq u_a \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{CC}}; \quad (6)$$

$$\underline{\underline{\sum_{b \in \mathcal{B}(v, t)} y_b \leq u_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \{1, \dots, T\}; \quad (7)}}$$

$$\underline{\underline{\sum_{s \in \mathcal{S}(e, t)} z_s \leq u_e \quad \forall e \in \mathcal{E}, \forall t \in \{1, \dots, T\}; \quad (8)}}$$

$$\text{s.t. } \sum_{a \in \mathcal{A}^+(n)} x_{ap} - \sum_{a \in \mathcal{A}^-(n)} x_{ap} = w_n^p \quad \forall n \in \mathcal{N}^C, \forall p \in \mathcal{P}; \quad (2)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{asp} \leq u_s \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{SM}}, s \in \mathcal{S}; \quad (13)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{bp} \leq u_b \quad \forall b \in \mathcal{B}. \quad (14)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{ap} \leq u_a \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{CC}}; \quad (6)$$

緩和後

6.2 Block-Dynamic Slope Scaling

$$\text{Minimize } \Phi = \sum_{s \in \mathcal{S}} c_s^F z_s + \sum_{b \in \mathcal{B}} c_b^F y_b + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{a \in \mathcal{A}} c_{ap} x_{ap} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{a \in \mathcal{A}^+(n)} x_{ap} - \sum_{a \in \mathcal{A}^-(n)} x_{ap} = w_n^p \quad \forall n \in \mathcal{N}^C, \forall p \in \mathcal{P}; \quad (2)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{bp} \leq y_b u_b \quad \forall b \in \mathcal{B}; \quad (3)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{asp} \leq z_s u_s \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{SM}}, s \in \mathcal{S}; \quad (4)$$

$$\underline{\underline{y_b \leq z_{s(l)} \quad \forall b \in \mathcal{B}, l \in \mathcal{L}(b); \quad (5)}}$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{ap} \leq u_a \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{CC}}; \quad (6)$$

$$\sum_{b \in \mathcal{B}(v, t)} y_b \leq u_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \{1, \dots, \mathbf{T}\}; \quad (7)$$

$$\underline{\underline{\sum_{s \in \mathcal{S}(e, t)} z_s \leq u_e \quad \forall e \in \mathcal{E}, \forall t \in \{1, \dots, \mathbf{T}\}; \quad (8)}}$$

列車の運行に関する制約のみを取り除く

(z_s に関する式のみを消す)



代わりに β_s と、

貨物 p とブロック b に関するコスト $c'_{bp} = (c_{ap} + \beta_s)$

を導入し、条件を緩和



輸送パターン \tilde{x} を求め、
作成するブロック \tilde{y} を求める

※ \tilde{x}, \tilde{y} は現時点で暫定解

6.2 Block-Dynamic Slope Scaling

$$\text{Minimize } \Phi = \sum_{s \in \mathcal{S}} c_s^F z_s + \sum_{b \in \mathcal{B}} c_b^F y_b + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{a \in \mathcal{A}} c_{ap} x_{ap} \quad (1) \quad \text{AP}(\beta): \quad \text{Minimize } \left\{ \sum_{b \in \mathcal{B}} c_b^F \cdot y_b + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{b \in \mathcal{B}} c'_{bp} x_{bp} \right. \\ \left. + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{a \in \mathcal{A}^{\text{CW}} \cup \mathcal{A}^{\text{CC}} \cup \mathcal{A}^{\text{CH}}} c_{ap} \cdot x_{ap} \right\}, \quad (19)$$

$$\text{s.t. } \sum_{a \in \mathcal{A}^+(n)} x_{ap} - \sum_{a \in \mathcal{A}^-(n)} x_{ap} = w_n^p \quad \forall n \in \mathcal{N}^C, \forall p \in \mathcal{P}; \quad (2) \quad \text{s.t. } \sum_{a \in \mathcal{A}^+(n)} x_{ap} - \sum_{a \in \mathcal{A}^-(n)} x_{ap} = w_n^p \quad \forall n \in \mathcal{N}^C, \forall p \in \mathcal{P}; \quad (2)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{bp} \leq y_b u_b \quad \forall b \in \mathcal{B}; \quad (3) \quad \sum_{p \in \mathcal{P}} x_{bp} \leq y_b u_b \quad \forall b \in \mathcal{B}; \quad (3)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{asp} \leq z_s u_s \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{SM}}, s \in \mathcal{S}; \quad (4) \quad \sum_{p \in \mathcal{P}} x_{asp} \leq u_s \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{SM}}, s \in \mathcal{S}. \quad (18)$$

$$\underline{\underline{y_b \leq z_{s(l)} \quad \forall b \in \mathcal{B}, l \in \mathcal{L}(b); \quad (5)}}$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{ap} \leq u_a \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{CC}}; \quad (6) \quad \sum_{p \in \mathcal{P}} x_{ap} \leq u_a \quad \forall a \in \mathcal{A}^{\text{CC}}; \quad (6)$$

$$\sum_{b \in \mathcal{B}(v, t)} y_b \leq u_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \{1, \dots, \mathbf{T}\}; \quad (7) \quad \sum_{b \in \mathcal{B}(v, t)} y_b \leq u_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, \forall t \in \{1, \dots, \mathbf{T}\}; \quad (7)$$

$$\underline{\underline{\sum_{s \in \mathcal{S}(e, t)} z_s \leq u_e \quad \forall e \in \mathcal{E}, \forall t \in \{1, \dots, \mathbf{T}\}; \quad (8)}}$$

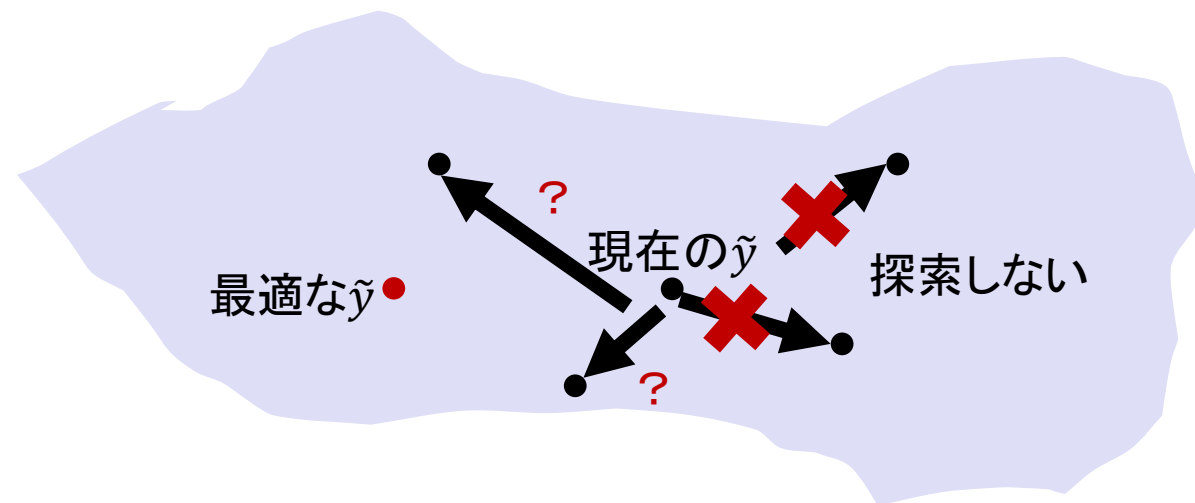
緩和後

6.2 Block-Dynamic Slope Scaling

6.1 Basic Slope Scaling と違い、
ブロック作成に関する制約を取り除かなかった分、
作成するブロック \tilde{y} の暫定解を
より正確に求める必要がある



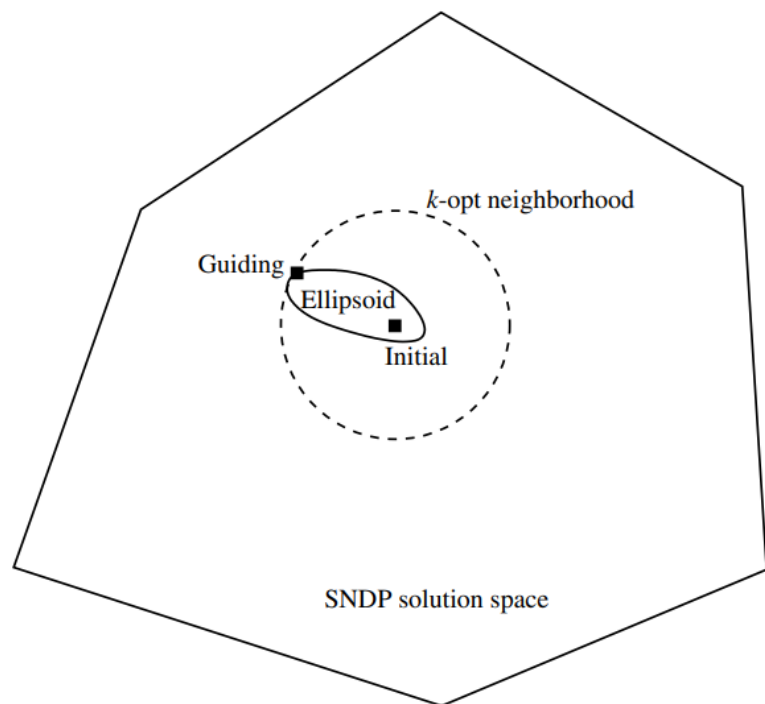
タブー探索により、
作成するブロックの条件を少しずつ変えて、
より最適な \tilde{y} を見つけ、更新していく



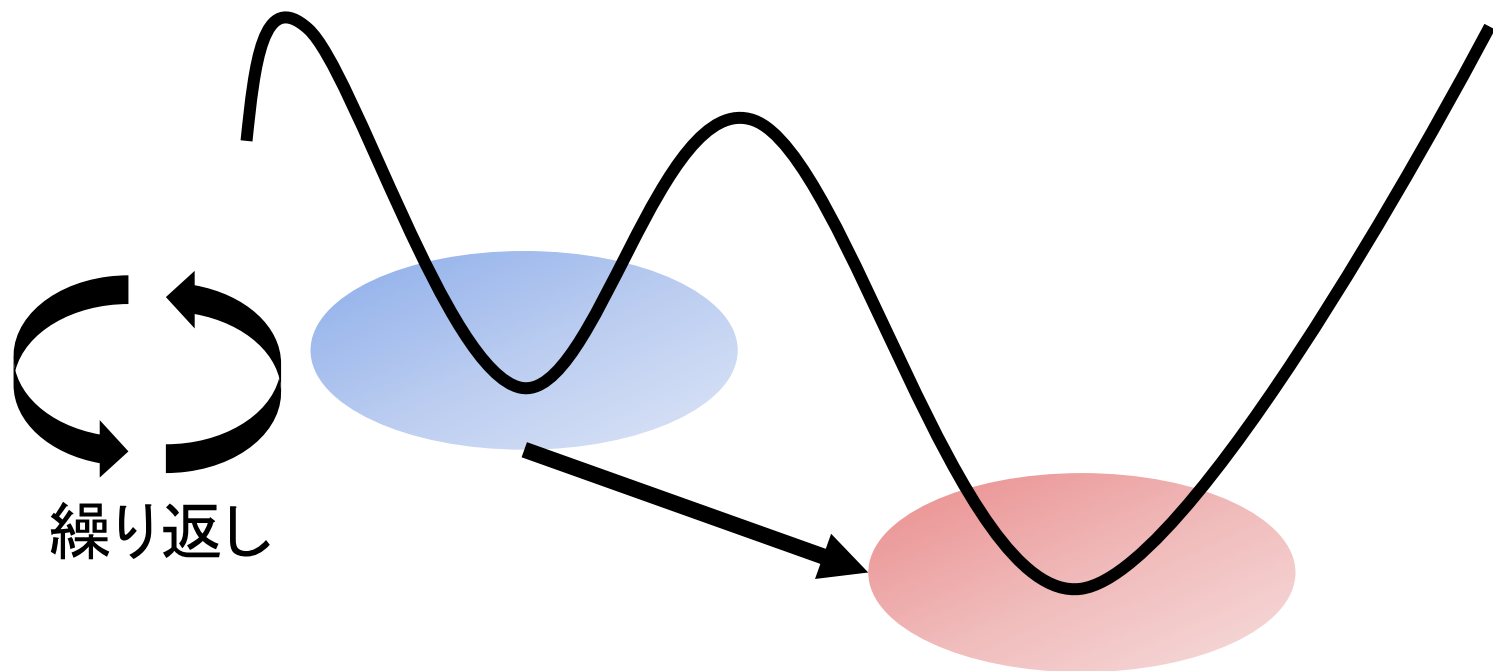
6.3 最適解の探索

輸送パターン、作成するブロック、運行するサービスの暫定解が得られた

Figure 8. Ellipsoid within the k -opt neighborhood.



Ellipsoidal Search
(局所的)



Long-Term-Memory-Based Perturbation
(広範囲)

輸送パターン、作成するブロック、運行サービスの暫定解が得られた



鉄道ネットワーク、貨物輸送需要、列車とブロックの候補を含んだ複数の実データを用いて、従来のCPLEX、Basic Slope Scaling、Block-Dynamic Slope Scalingのそれぞれの場合で一定時間内に解法を得られるか確認

7. 実データに基づく数値実験

Table 1. Performance results on instance set S.

Inst	CPLEX	OptGap (%)	BSS2CPLEX gap (%)	DSS2BSS gap (%)
p01	75,157	0.00	0.00	0.00
p02	72,403	0.00	0.11	0.13
p03	78,629	0.00	0.13	0.02
p04	82,784	0.00	0.00	0.00
p05	98,705	0.00	0.00	0.06
p06	107,663	2.78	0.00	0.19
p07	256,530	35.29	-28.46	1.55
p08	227,342	36.07	-26.86	1.10
p09	167,011	26.76	-20.30	0.07
p10	228,857	36.23	-30.75	0.15
p11	140,270	10.69	-5.38	1.46
p12	187,967	17.61	-10.93	1.66
p13	×	—	—	-0.07
p14	×	—	—	-4.88
p15	×	—	—	-2.06

Table 2. Performance results on instance set L.

Inst	CPLEX	OptGap (%)	BSS2CPLEX gap (%)	DSS2BSS gap (%)
p16	94,777	1.76	-0.11	0.27
p17	90,010	2.54	-0.51	0.64
p18	128,097	0.61	0.00	0.32
p19	79,414	0.00	0.00	0.19
p20	129,305	0.00	0.00	0.00
p21	103,180	3.60	1.48	1.51
p22	217,485	49.59	-34.58	1.26
p23	218,377	36.25	-27.58	0.36
p24	×	—	—	1.23
p25	205,420	32.00	-24.10	0.20
p26	×	—	—	1.52
p27	246,209	34.47	-26.75	1.35
p28	×	—	—	-3.60
p29	×	—	—	-1.79
p30	×	—	—	-3.08

混載型の鉄道貨物輸送の要素を包括した多レイヤ時空間ネットワークを導入し、最適な鉄道貨物輸送の運行計画を求めるモデルを構築した。

さらに、効率的なアルゴリズムを開発し、実データを基に実験した結果、実用性があることも判明した。