

SOPHIA U

理工学部同窓会会員大会 記念講演会 on 2025-11-15

低炭素社会のニーズに応える 鉄道オペレーション技術

上智大学理工学部
機能創造理工学科
学科長 宮武 昌史

Transportation Electrification & Smartification Lab.



本日の内容

- ❖ 自己紹介と研究室紹介
- ❖ 鉄道の学術的魅力
- ❖ 低炭素社会のニーズに応える鉄道オペレーション技術
 - ❖ (1) 基本的な考え方
 - ❖ (2) 省エネ運転
 - ❖ (3) 省エネダイヤ
 - ❖ (4) 蓄電装置の応用
- ❖ おわりに



自己紹介と研究室紹介

自己紹介

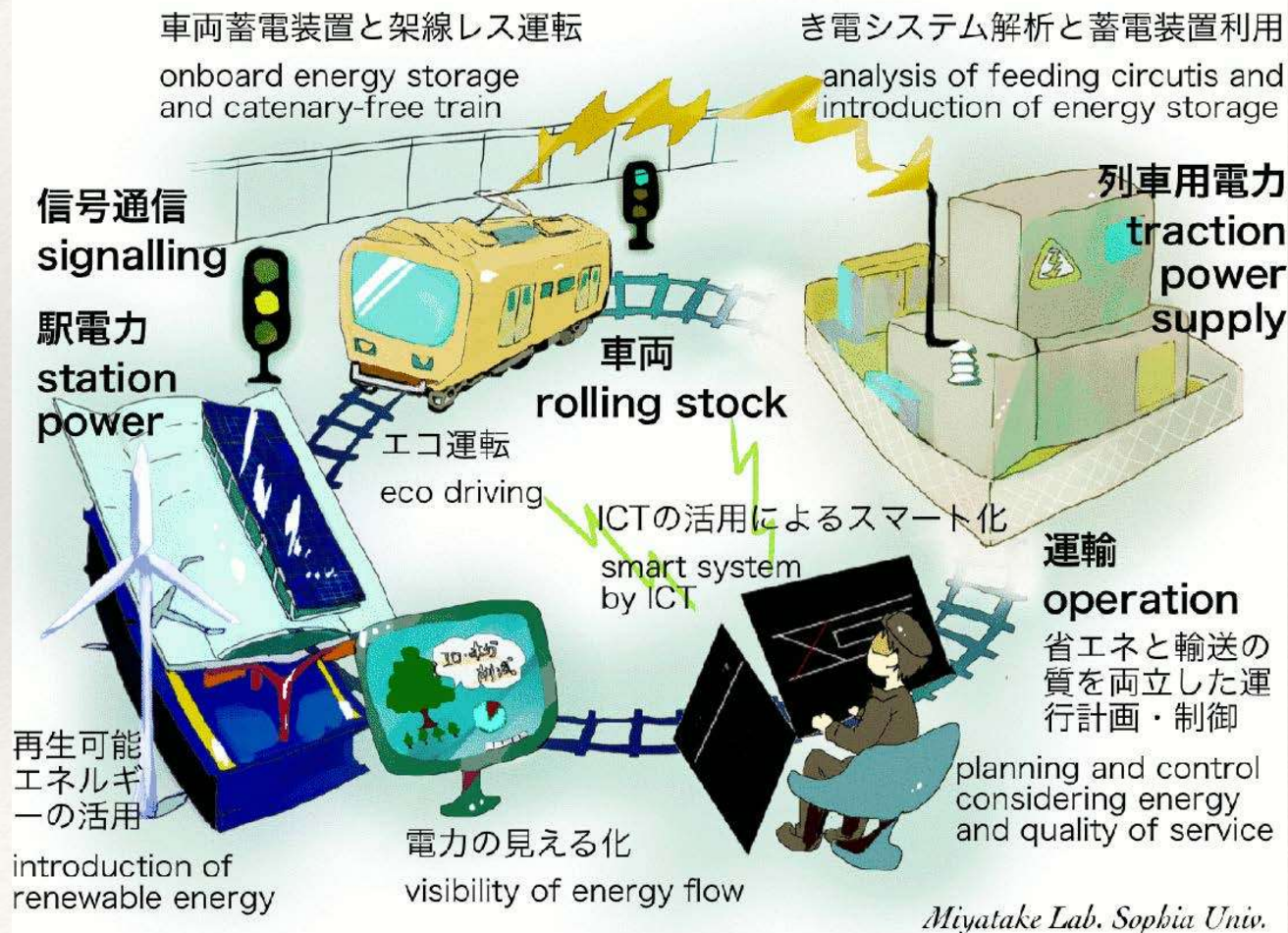


- ❖ 上智大学 理工学部 機能創造理工学科 教授 / 学科長 (2022~25)
 - ❖ 宮武 昌史 (みやたけ まさふみ)
 - ❖ 2000年4月 電気・電子工学科講師着任 機械工学科の電気系実験 (一般電工) も長年担当
- ❖ 「エネルギー・人・物を運ぶ社会インフラを電気工学で最適にデザイン」する研究に従事
 - ❖ <https://miyatake.main.jp/> miyatake@sophia.ac.jp X: [@myartac](#)
- ❖ 現在の担当科目
 - ❖ 制御基礎, モータドライブシステムI・II, Motor Drive Systems (🇬🇧), Power Electronics (🇬🇧), 電気エネルギー管理と制御 (大学院), Green Science and Engineering (Electrical and Electronics Engineering) (大学院🇬🇧), 発変電工学 (千葉大) 等

自己紹介

- ❖ 電気学会 2022年 電気学会産業応用部門大会 実行委員長
 - ❖ 1000人規模の学会を上智で開催
- ❖ 国土交通省
 - ❖ 鉄道技術開発課題評価委員会 委員
 - ❖ 中小企業イノベーション創出推進事業 外部評価委員
- ❖  教皇庁立コミージャス大学
 - ❖ Instituto de Investigación Tecnológica, Scientific Advisory Board Member / IIT研究所 科学諮問委員
- ❖ 国際規格 IEC TC9 MT62427 "Railway applications – Compatibility between rolling stock and train detection systems" コンビーナ

研究対象イメージ



エネルギー・人・物を運ぶ
社会インフラを電気工学で
最適にデザインする

鉄道の学術的魅力

鉄道の学術的魅力と上智

- ❖ 鉄道は技術のるつぼ → **【複合知】**
 - ❖ 電気電子工学，機械工学，情報工学，土木工学，...
- ❖ 鉄道は社会の縮図 → **【文理融合】**
 - ❖ 人間が運行し利用する  文系の知見も必要：ex. 心理学 etc.
- ❖ 鉄道技術は世界共通でありまた各国独自 → **【国際性】**
 - ❖ 世界中で利用されるが，国や地域による差異が大きい
- ❖ SDGsへの貢献 → **【For others, with others】**
 - ❖ 安全，正確，低環境負荷，誰でもアクセスできるモビリティ

鉄道の欠点

- ❖ 輸送力の調整が苦手
 - ❖ 郊外では空気輸送，都心では満員
- ❖ コスト高
 - ❖ 安全性・正確性への高度なニーズ
 - ❖ 公的補助の是非
- ❖ 架線の持つ利害得失
 - ❖ 蓄電池技術の向上に伴い，将来的に架線の優位性喪失？

理学と工学の違い

- ❖ 機能創造理工学科は理学と工学を両方とも学べる
 - ❖ 理学は自然現象のみを取り扱い，それを突き詰めていく
 - ❖ 運動方程式，回路方程式...
 - ❖ 工学は人工的に作り出した特性や社会的要因（法律・経済）をも取り扱う
 - ❖ 速度制限，最大電力，走行時分...
- ❖ 今回の内容は工学に全振りしたような研究

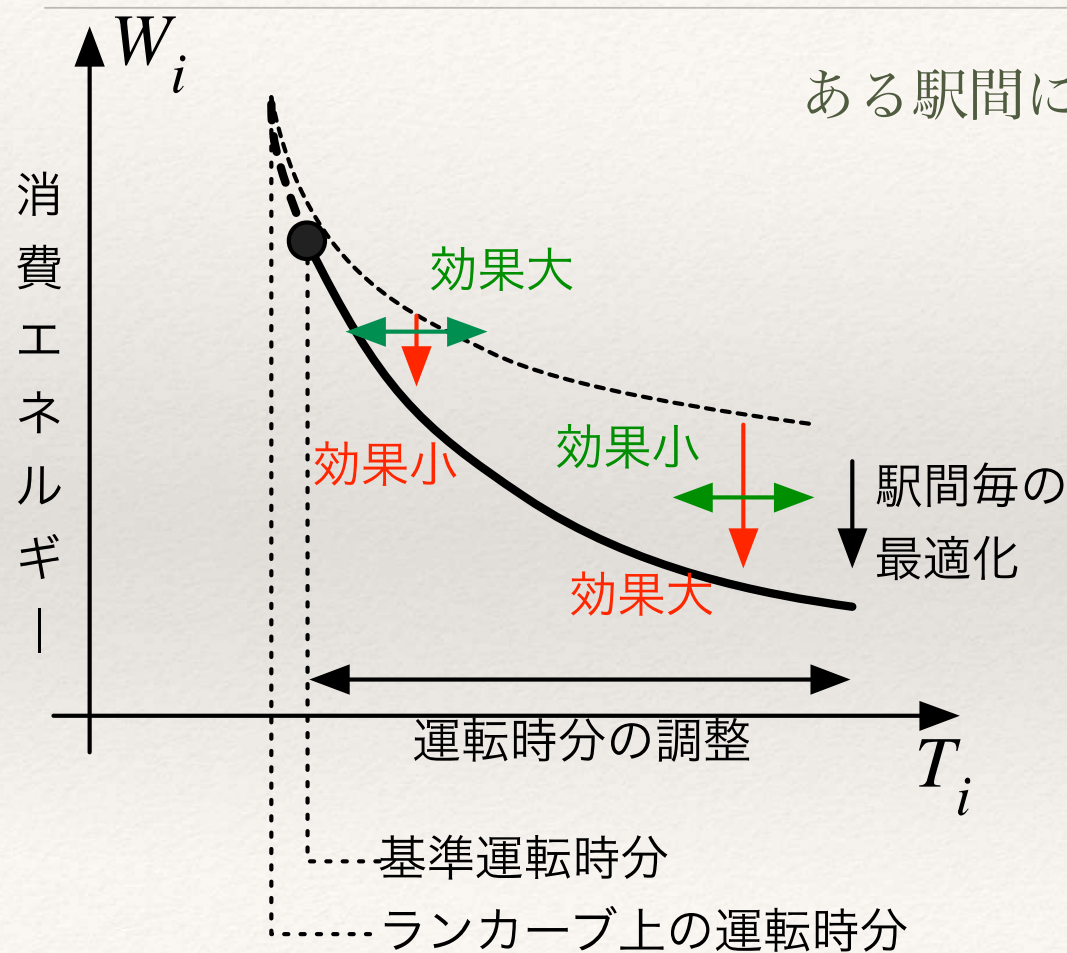
低炭素社会のニーズに応える 鉄道オペレーション技術

(1) 基本的な考え方

省エネ・低炭素化の方策

- ❖ 機器効率向上（ハードウェア的手法）
 - ❖ SiCインバータ，PMSM，蓄電装置，ハイブリッド化（自動車） ...
 - ❖ 追加コストが大きく，一斉の導入が困難
- ❖ 運用の改善（ソフトウェア的手法）
 - ❖ ダイヤ，運転，運行管理
 - ❖ 追加コストが少なく，一斉の導入が相対的に容易
 - ❖ 計算機，支援端末 etc.

運転における省エネの基本思想



- 曲線を下にずらす努力
- 運転技術の向上
- 駅間毎の最適化
- 曲線上への動作点の設定
- ダイヤの最適設定

余裕を生かして省エネという
新たな価値を創造

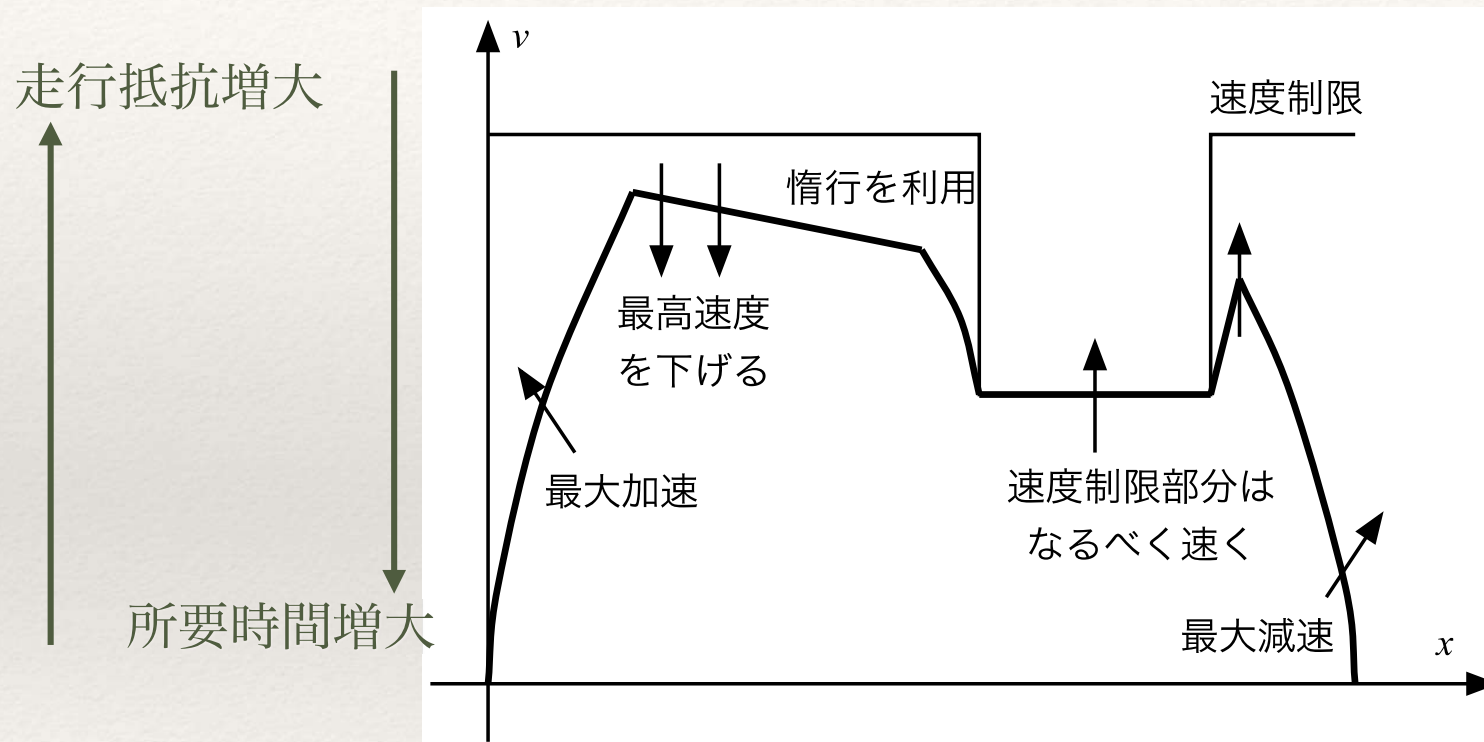
多面的な評価項目の必要性

- ❖ 電力（ピーク値，1分定格）
- ❖ 30分デマンド電力（物理的には電力量？）
- ❖ 電力量（力行電力量，回生電力量，消費電力量）
 - ❖ CO2排出量
- ❖ 乗客サービス（総旅行時間，乗換回数，着席）
 - ❖ OD データを元に計算
- ❖ 列車遅延時の頑健性
- ❖ レジリエンス

- ❖ 多目的最適化へ...

(2) 省エネ運転

最小エネルギー運転問題



与えられた距離を与えられた時間で走る際のエネルギー消費を最小化

↓
複雑な要因が絡むため、正確な解の導出は数値解法しかない

惰行を効果的に挟むことで電氣的損失を小さくできる
特に誘導機，リラクタンスモータでその効果は絶大

最適制御問題としての定式化の概要

目的関数

$$\text{Minimize } J = \int_0^T p \, dt \quad \text{電力量}$$

電力量を最小化する u を求める

u は加減速を設定する入力変数

制約条件

$$\frac{d}{dt}x = v \quad \text{速度と距離}$$

$$M \frac{d}{dt}v = F(u, v) - R(v, x) \quad \text{運動方程式}$$

$$v(0) = 0, x(0) = 0 \quad \text{初期条件}$$

$$v(T) = 0, x(T) = L \quad \text{終端条件}$$

$$-1 \leq u \leq 1 \quad \text{制御入力変数の範囲}$$

$$F(u, v) = \begin{cases} uF_{\max}(v) & (u \geq 0) \\ uF_{\min}(v) & (u < 0) \end{cases} \quad \text{加減速力}$$

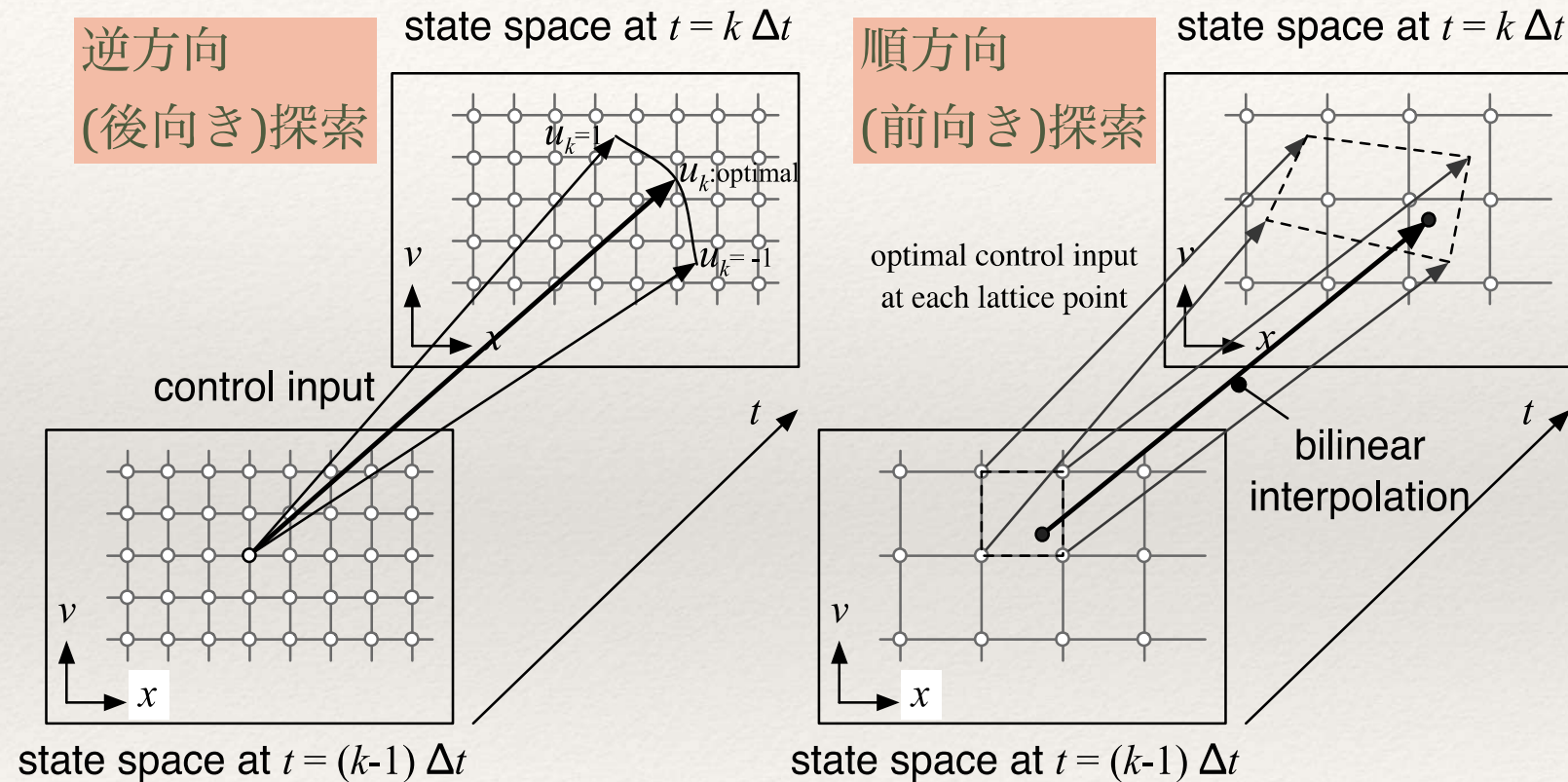
$$v \leq v_{\max}(x) \quad \text{速度制限}$$

$$p = \begin{cases} \frac{1}{\eta_a} Fv & (u \geq 0) \\ \eta_b Fv & (u < 0) \end{cases} \quad \text{動力-電力変換}$$

省エネ運転に向けたアプローチ

- ❖ 数式モデルに基づく理論的な最適化
 - ❖ 実務的工夫により改善を繰り返す
 - ❖ データに基づき「良い運転」を抽出する
-
- ❖ どれが優れているという観点より，それぞれの特徴を理解してうまく活かすのが重要

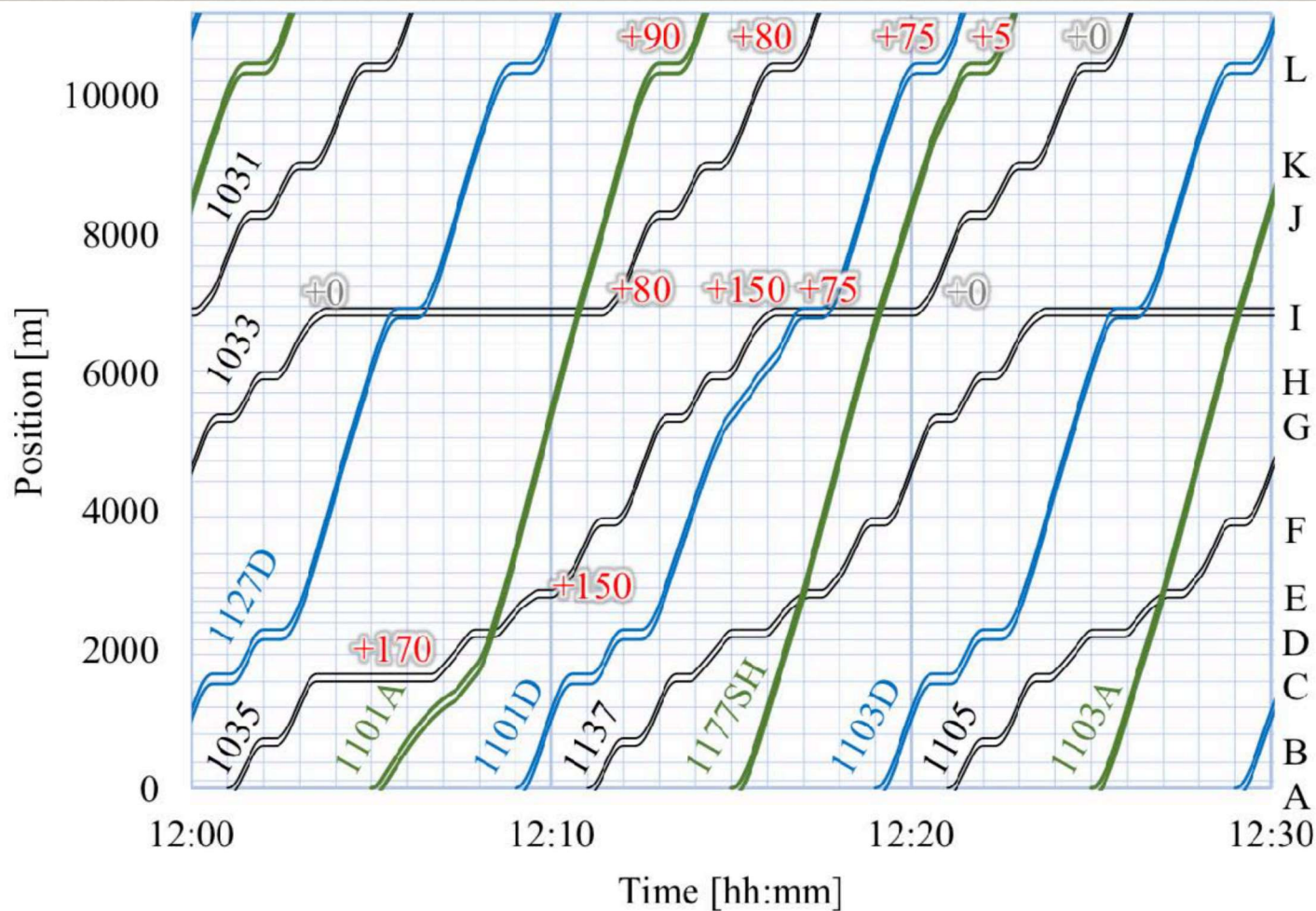
動的計画法の適用



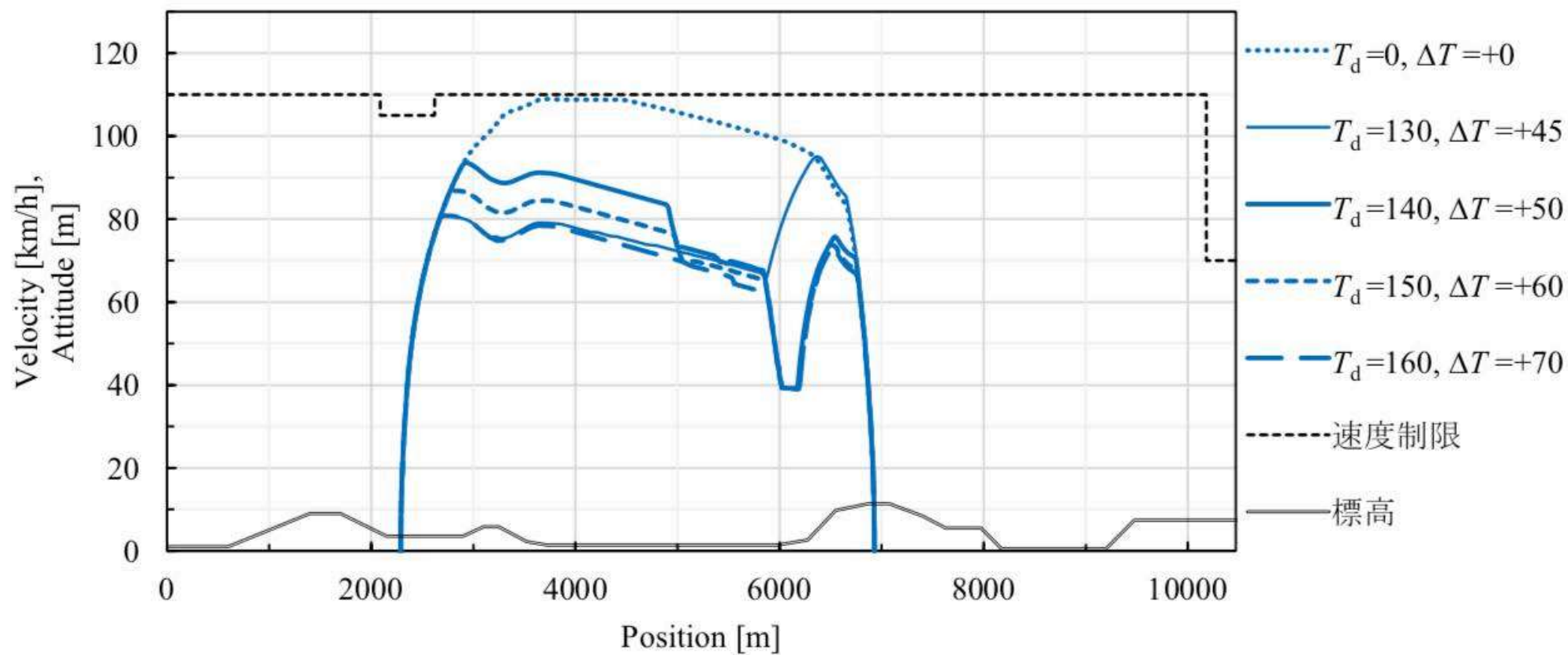
時間方向に離散化，さらに状態平面も離散化
→ 多段階意思決定問題に変換

終端条件はペナルティ法で考慮
$$\phi(x_N, v_n) = c_1(x_N - L)^2 + c_2 v_N^2$$

検討例：遅延時の運転



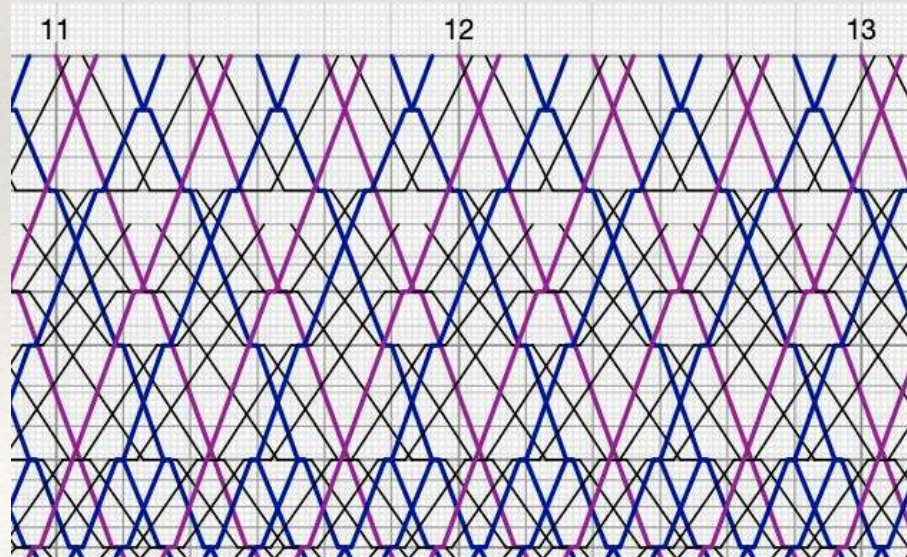
運転曲線の例



(3) 省エネダイヤ

列車ダイヤとは

- ❖ 列車の運転は ...(中略)... 出発時刻，通過時刻，到着時刻等を定めて行わなければならない by 国土交通省令
- ❖ 列車の編成数や性能，軌道条件，旅客需要を考慮し，輸送品質的にも設備投資的にもバランス良く計画



省エネダイヤの定式化

合計消費エネルギー

$$\text{Minimize } J(T_1, \dots, T_N) = \sum_{i=1}^N W_i(T_i)$$

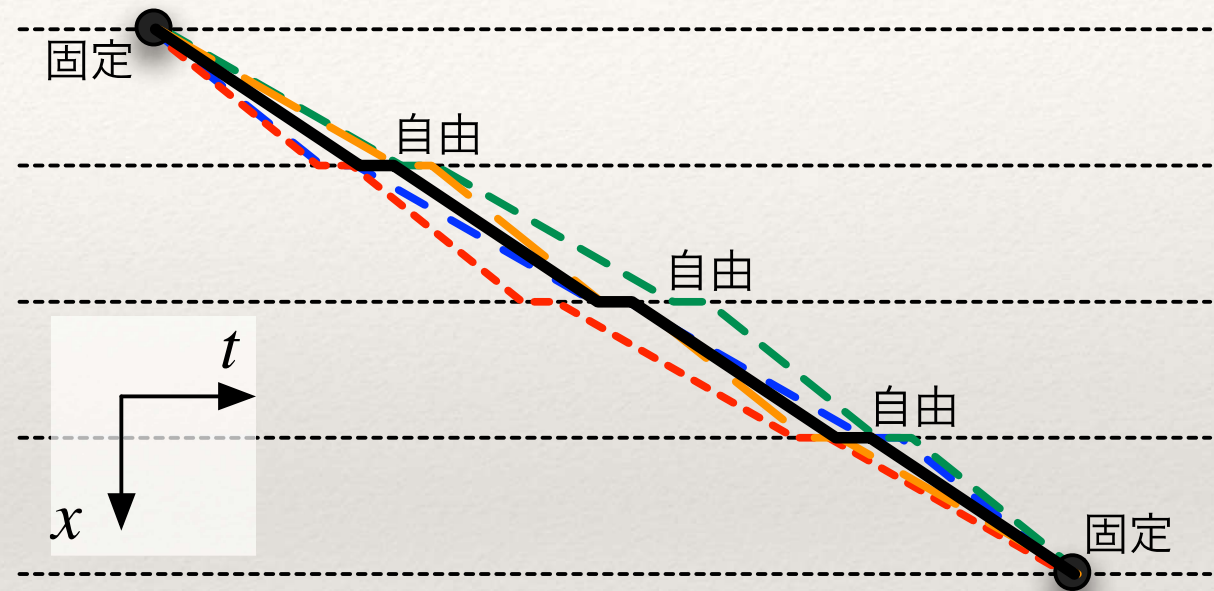
合計駅間所要時分

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^N T_i = T_S$$

ラグランジュの未定乗数法を適用

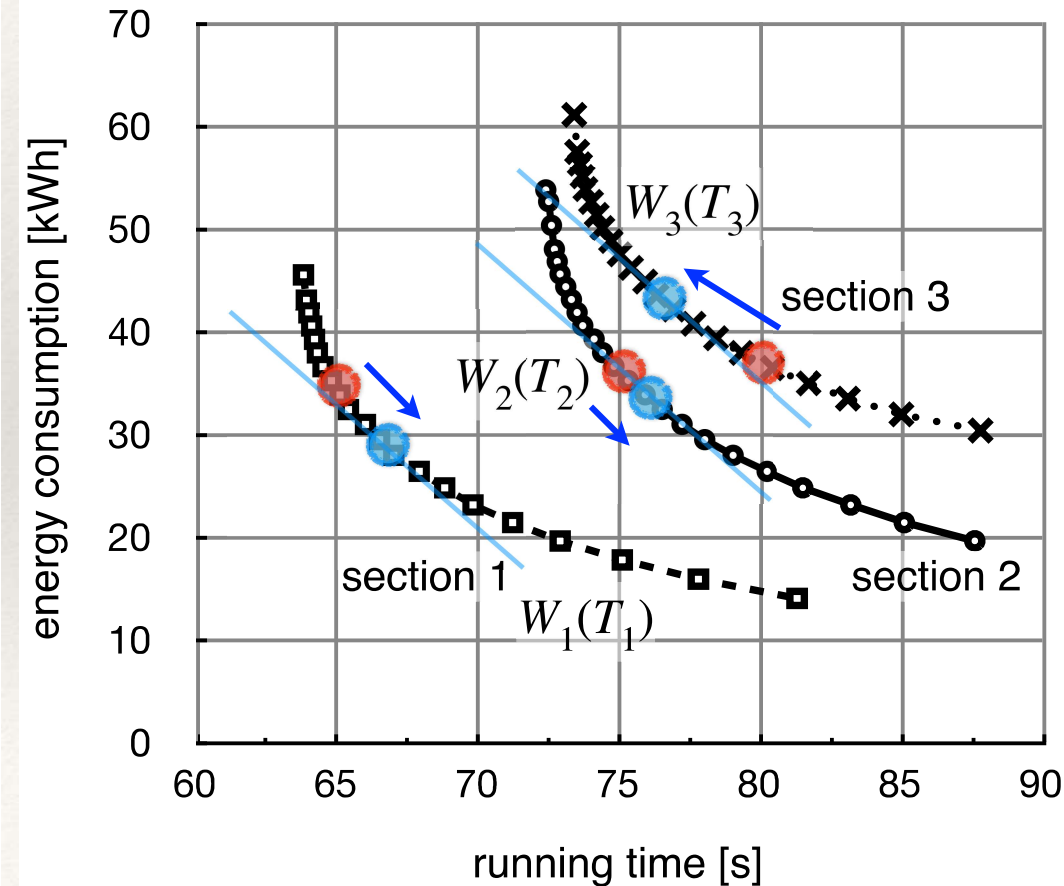
$$L(T_1, \dots, T_N, \lambda) = \sum_{i=1}^N W_i(T_i) + \lambda \left(\sum_{i=1}^N T_i - T_S \right)$$

$$\frac{\partial L}{\partial T_i} = \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \quad (i = 1, \dots, N)$$



時間というリソースを各駅間に
最適分配する問題

普遍的法則の導出



最終的に得られる関係式

$$\frac{\partial W_1}{\partial T_1} = \dots = \frac{\partial W_N}{\partial T_N} = \lambda$$

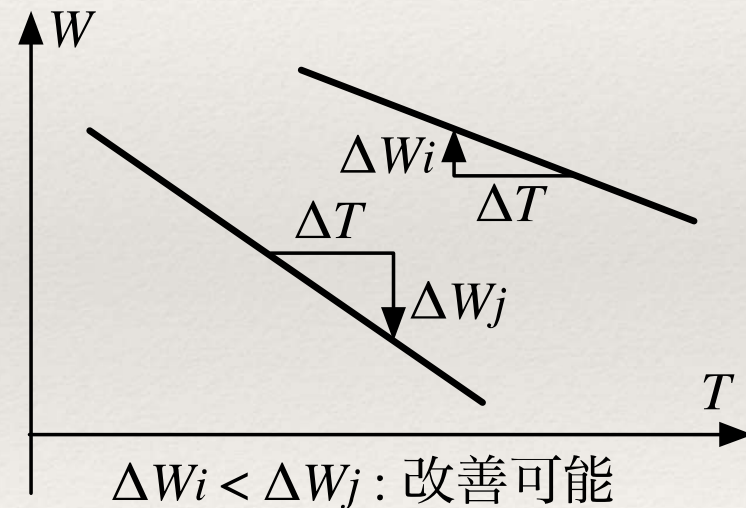
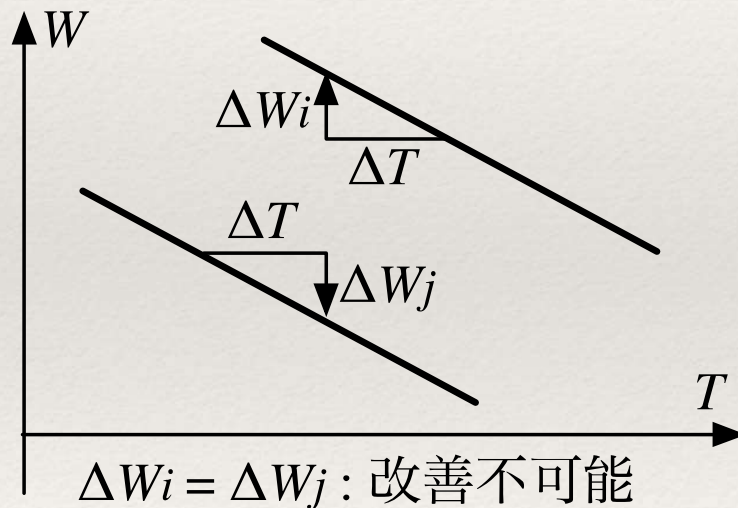
等増分消費エネルギー則

グラフ上の傾きが揃うように
走行時分を設定すれば良い

等増分消費エネルギー則

直観的なイメージ

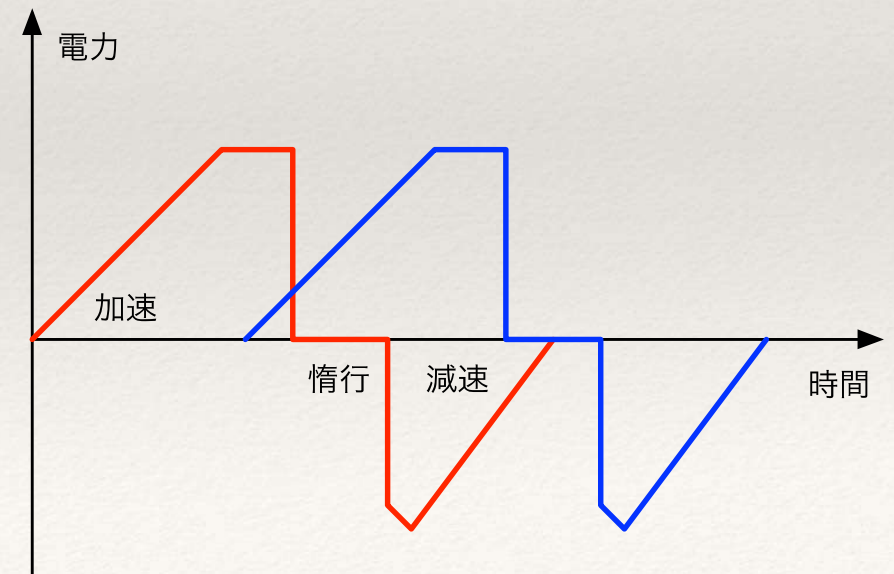
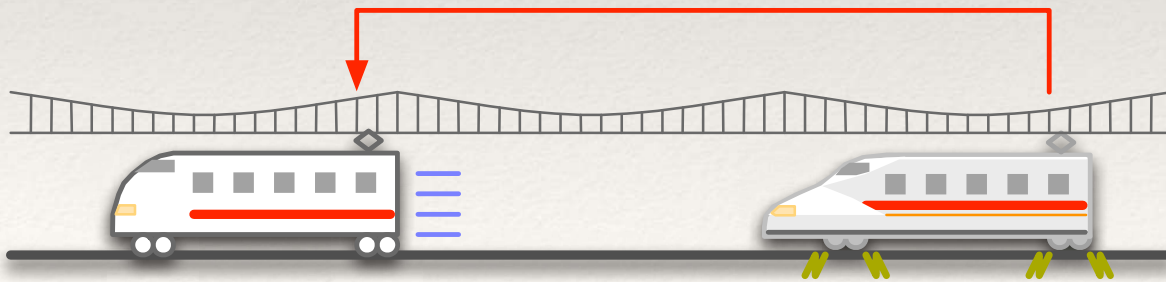
点の近傍で直線近似し，2つの駅間を選んで微調整



これ以上改善ができない＝最適，と考える

回生電力の有効利用

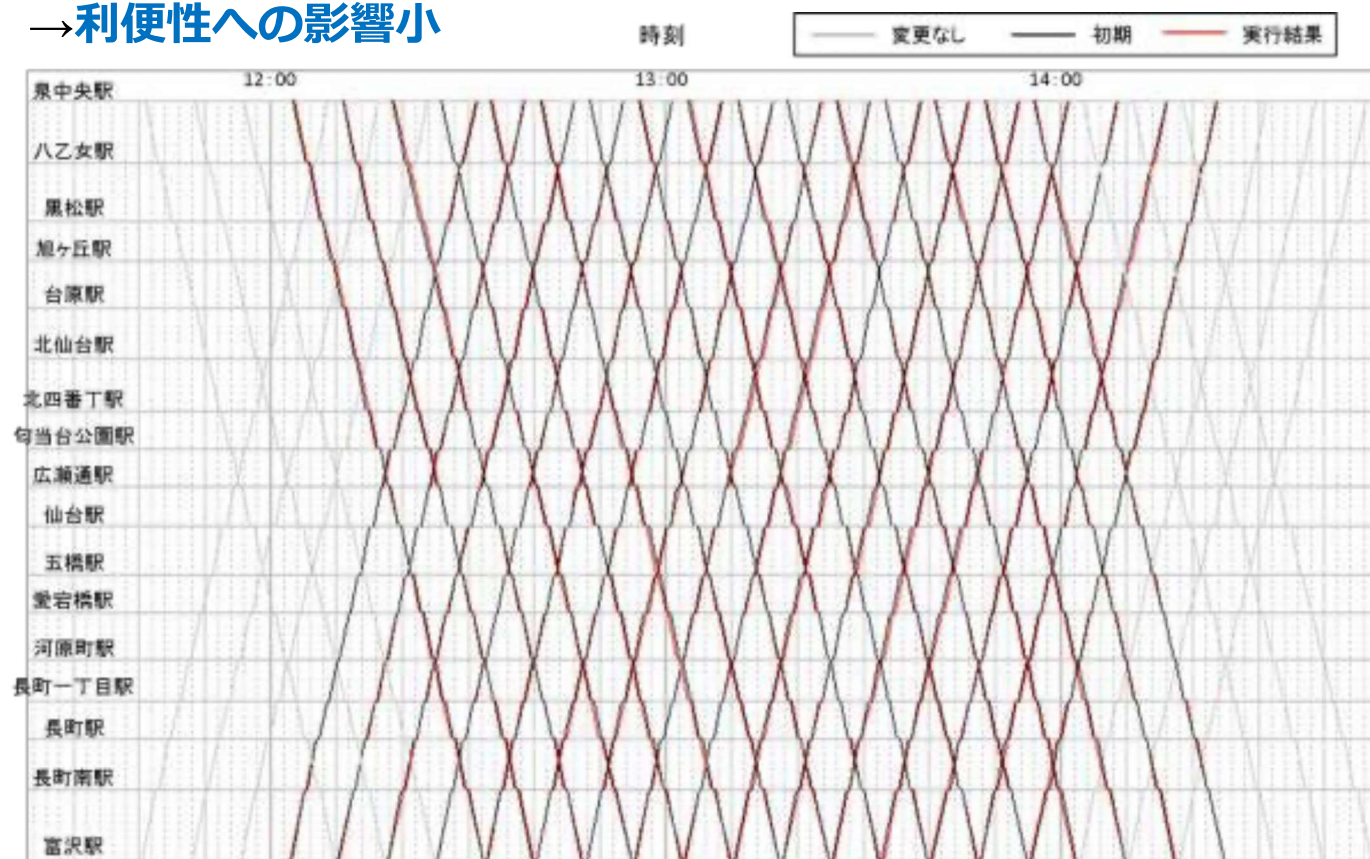
- ❖ 回生電力をうまく再利用できるかが以前から問題
- ❖ 加速する電車と減速する電車のタイミングをうまく合わせるダイヤ？
 - ❖ 省エネを決める鍵だが、タイミングのズレに弱い
- ❖ 蓄電池の利用等も



ダイヤの微調整で力行と回生を合わせて省エネ

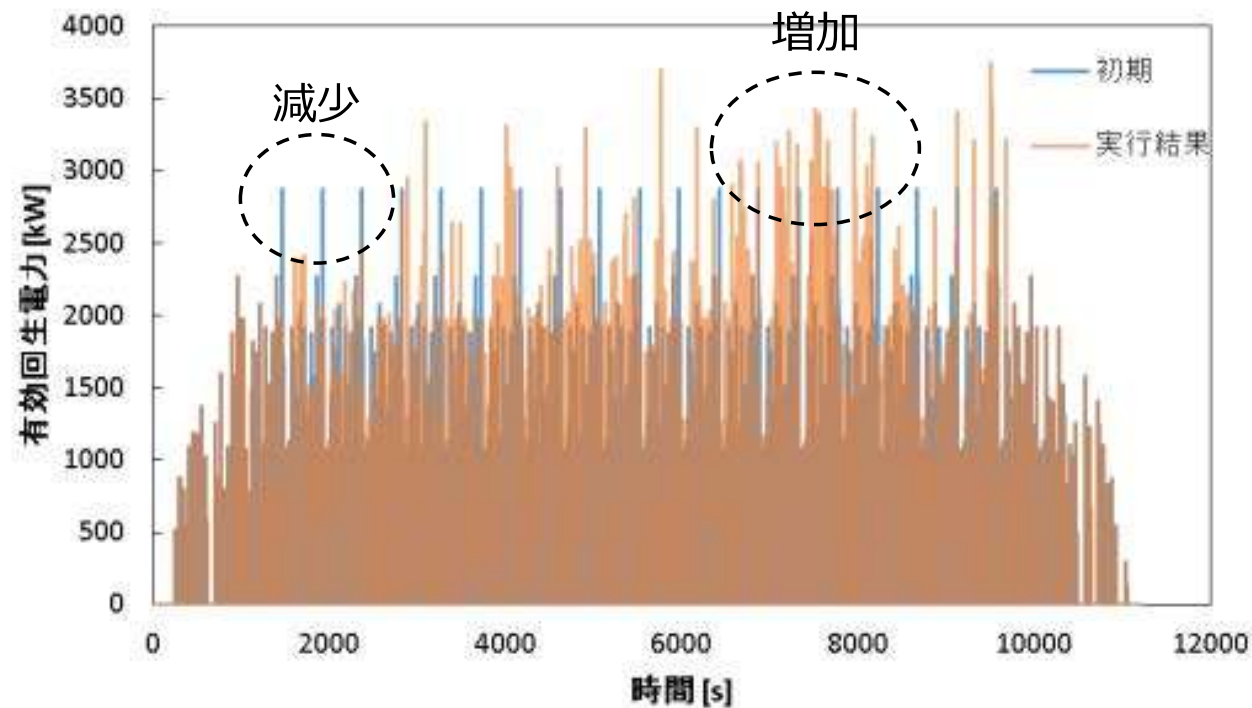
ダイヤの変更はわずか

→ 利便性への影響小



回生電力を有効利用するダイヤ

- 有効回生電力が増加する時間帯に偏り
初期ダイヤにおける力行と回生制動の同期を崩してでも
特定の時間帯に電力融通を集中させたため



所与のエネルギーの割り当てという考え方

最小化する対象は
時間あたり需要(人/秒)×時間(秒)
「この路線上に何人存在するか」

内生変数は、各区間所要時間 T_i 、各区間消費エネルギー W_i 、列車編成数 N の $2K+1$ 個

単位時間あたり区間需要: a_i
×
区間所要時間: T_i

駅での停車時間: b_i
×
単位時間あたり駅停車需要: c_i

単位時間あたり
路線需要: I

$$\min \sum_{i=1}^K (a_i T_i) + \sum_{i=1}^K (b_i c_i) + I \frac{\sum_{i=1}^K (b_i + T_i)}{2N}$$

利用可能
電力最大値: C

1編成あたり
冷房消費電力: θ

列車待ち時間期待値
= 周回所要時間 ÷ 列車編成数 $N \div 2$

$$\text{s.t. } C \geq D + N \left(\theta + \frac{\sum_{i=1}^K W_i}{\sum_{i=1}^K (b_i + T_i)} \right), N_0 - N \geq 0$$

信号・照明の
消費電力: D

1編成あたり動力消費電力
= 周回に費やしたエネルギー
÷ 周回所要時間

使用電力制限に伴い
列車編成数 N は増加しない

所与のエネルギーの割り当てという考え方

始発から終着までの所要時分を可変とし，使用するエネルギーが与えられた場合に，最も利用者の旅行時間を短くするようにエネルギーを最適配分

$N_0 > N$ のとき（列車運用数削減）

$$\frac{\partial W_i}{\partial T_i} = -\frac{2(C-D)}{I}a_i - \theta$$

駅間の利用者数

列車の補機電力

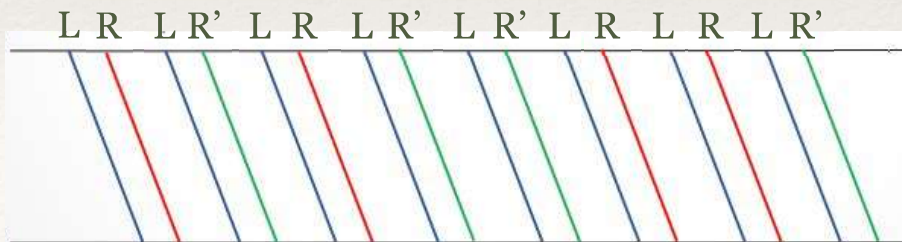
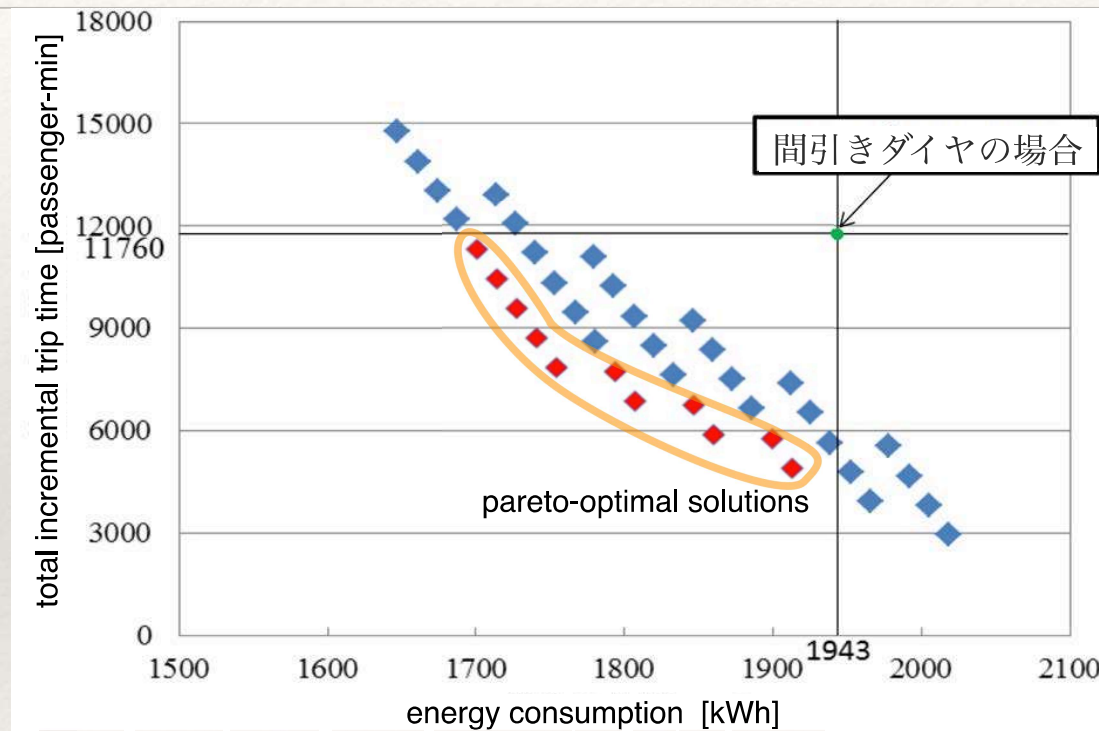
利用者が多い駅間ほど
増分消費エネルギーを
多く（余裕を少なく）
割り当てる

$N_0 = N$ のとき（列車運用数最大）

$$\frac{\partial W_i}{\partial T_i} = \frac{C-D}{N_0} - \theta - (C-D)\left(a_i + \frac{I}{2N_0}\right)\mu_1^{-1}$$

$$N_0 = N, 0 < \mu_1 < \frac{(C-D)(2Na_j + I)}{2(C-D - \theta N)}, a_j = \min(a_i)$$

サービスとエネルギー

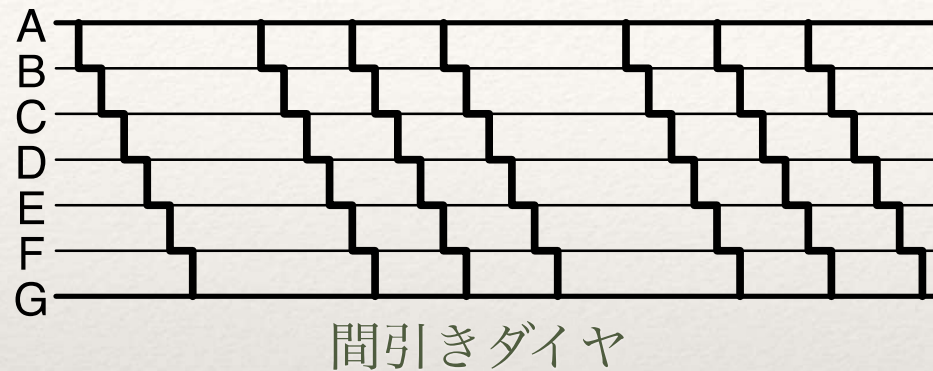


一部又は全部の
快速(R)を1〜3
駅通過

- 2つの評価量に対し
優劣の付けられない
解の集合（パレート
最適解）を求める
- さらに間引きよりも
良い解を選ぶ
- 11通りの解が存在

電力使用制限下の節電ダイヤ

車両運用，乗務員運用
が変わってしまう



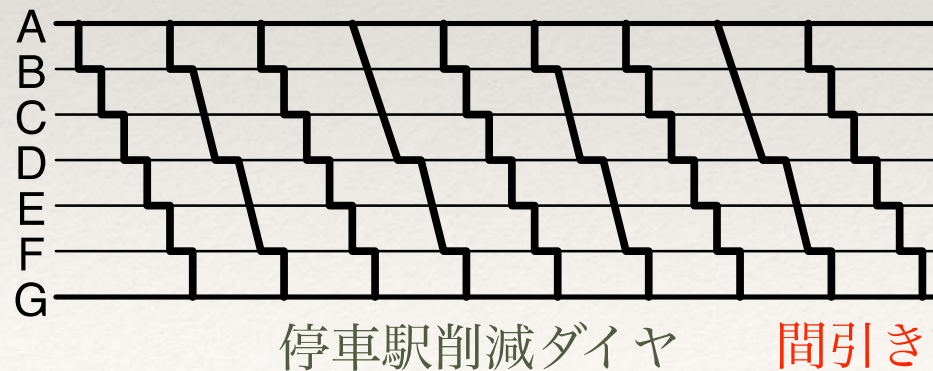
1943[kWh/h]

+11760[人・分]



ほぼ同じ不効
用で約12%の
電力量削減

車両運用，乗務員運用
を変える必要なし



1701[kWh/h]

+11364[人・分]

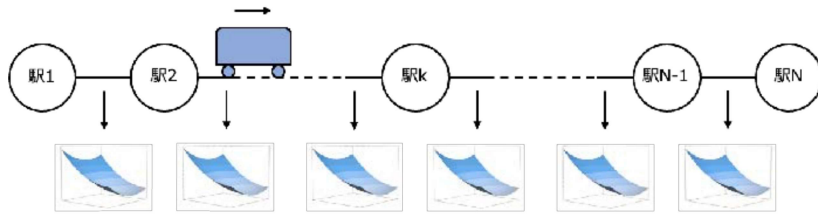
間引き前より23%の電力量削減

(4) 蓄電装置の応用

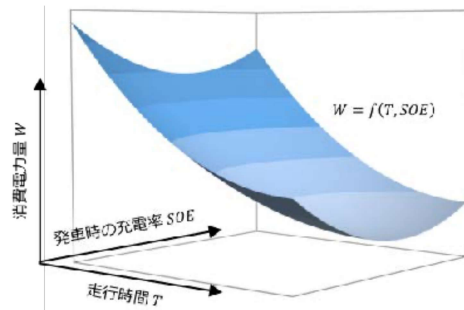
蓄電池駆動電車の最適化

各区間の消費電力量データを用いて最適化計算を実施

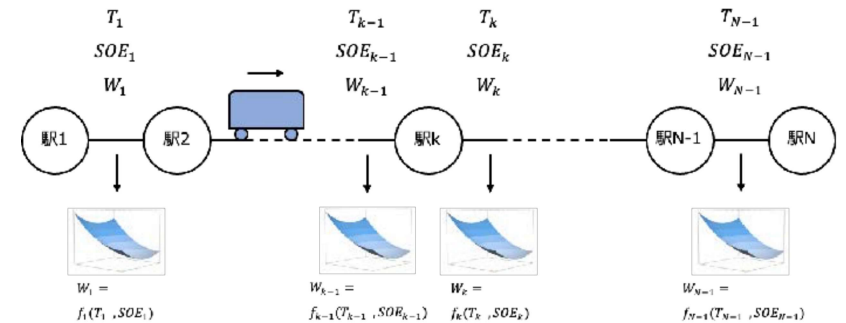
① シミュレーションでデータを取得



走行時の消費電力量
データを取得



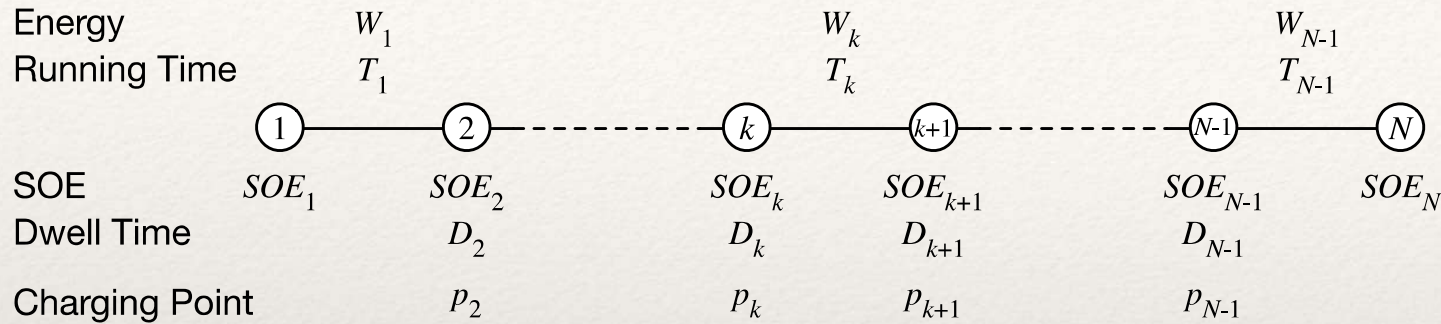
② 最適計画モデルの作成・計算



- 変数
- 目的関数
- 制約条件

最適化された
運行計画 を出力

蓄電池電車の最適ダイヤ



目的関数 $J = \sum_{k=1}^{N-1} W_k \rightarrow \min$ 走行時の消費エネルギー

制約条件

$$\sum_{k=1}^{N-1} T_k + \sum_{k=2}^{k-1} D_k = T \quad \text{総所要時間一定}$$

$$f_i(T_i, SOE_i, W_i) = 0 \quad \text{走行時分とSOEと電力量の関係}$$

$$SOE_{min}^k \leq SOE_k \leq SOE_{max}^k \quad \text{SOEの上下限}$$

$$SOE_1 = ISOE \quad \text{初期SOE}$$

$$SOE_{k+1} = SOE_k - c_1 W_k + c_2 p_{k+1} D_{k+1} \quad \text{途中のSOE}$$

$$T_{min}^k \leq T_k \leq T_{max}^k$$

$$D_{min}^k \leq D_k \leq D_{max}^k$$

時分の上下限

$$\sum_{k=1}^{N-1} p_k \leq M$$

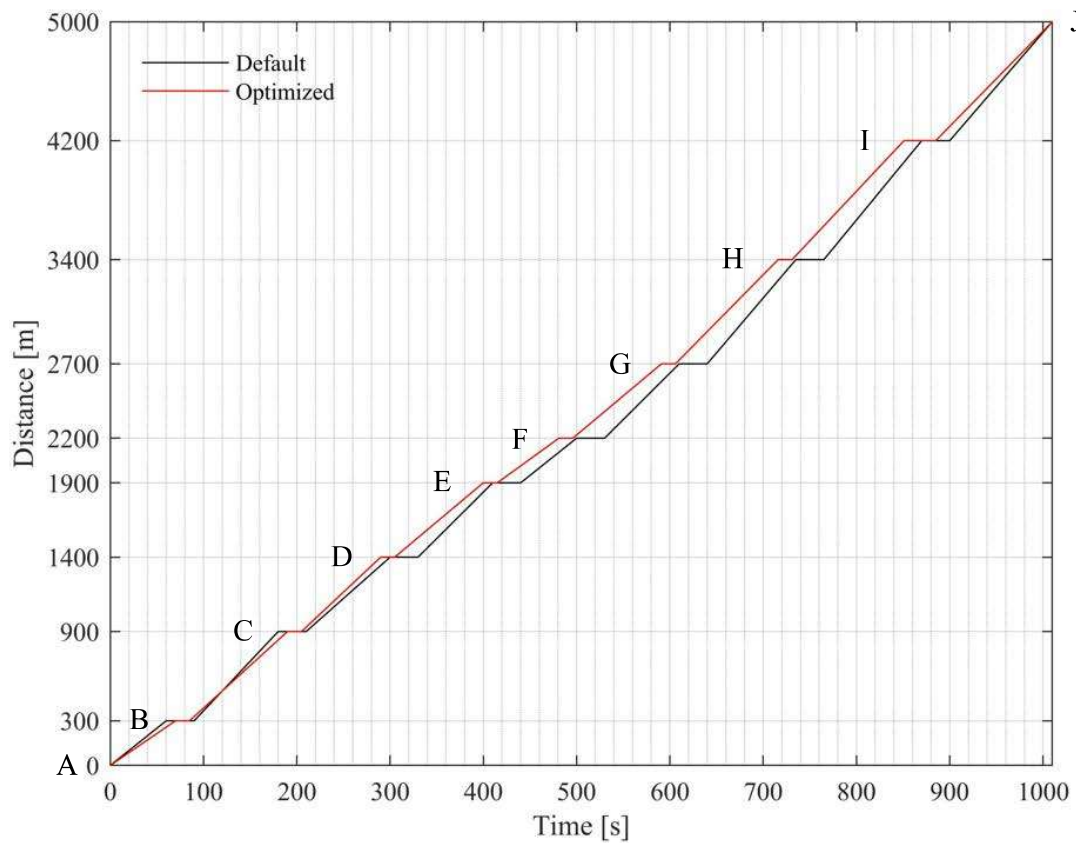
充電装置数

次の点を考慮してモデルの深度化を検討中

● 充電設備故障時の冗長性

● 単線での列車交換

ダイヤと充電設備位置の同時最適化



初期ダイヤと最適化ダイヤの比較

各充電装置個数の場合における消費電力量 [kWh]

充電駅の数	計算パターン	消費電力量	割合	充電駅
1	Default	実行不能		
	Optimized	実行不能		
2	Default	実行不能		
	Optimized	11.671		D,I
3	Default	11.995	100 [%]	D,H,I
	Optimized	11.660	97.2 [%]	D,H,I
4	Default	11.994	100 [%]	E,G,H,I
	Optimized	11.649	97.1 [%]	D,G,H,I
5	Default	11.994	100 [%]	D,E,G,H,I
	Optimized	11.638	97.0 [%]	B,C,D,F,I
6	Optimized	11.628	96.9 [%]	B,C,E,F,G,I
7	Optimized	11.618	96.9 [%]	B,D,E,F,G,H,I
8	Optimized	11.609	96.8 [%]	B,C,D,E,F,G,H,I

Methodology

9

■ Energy flow model

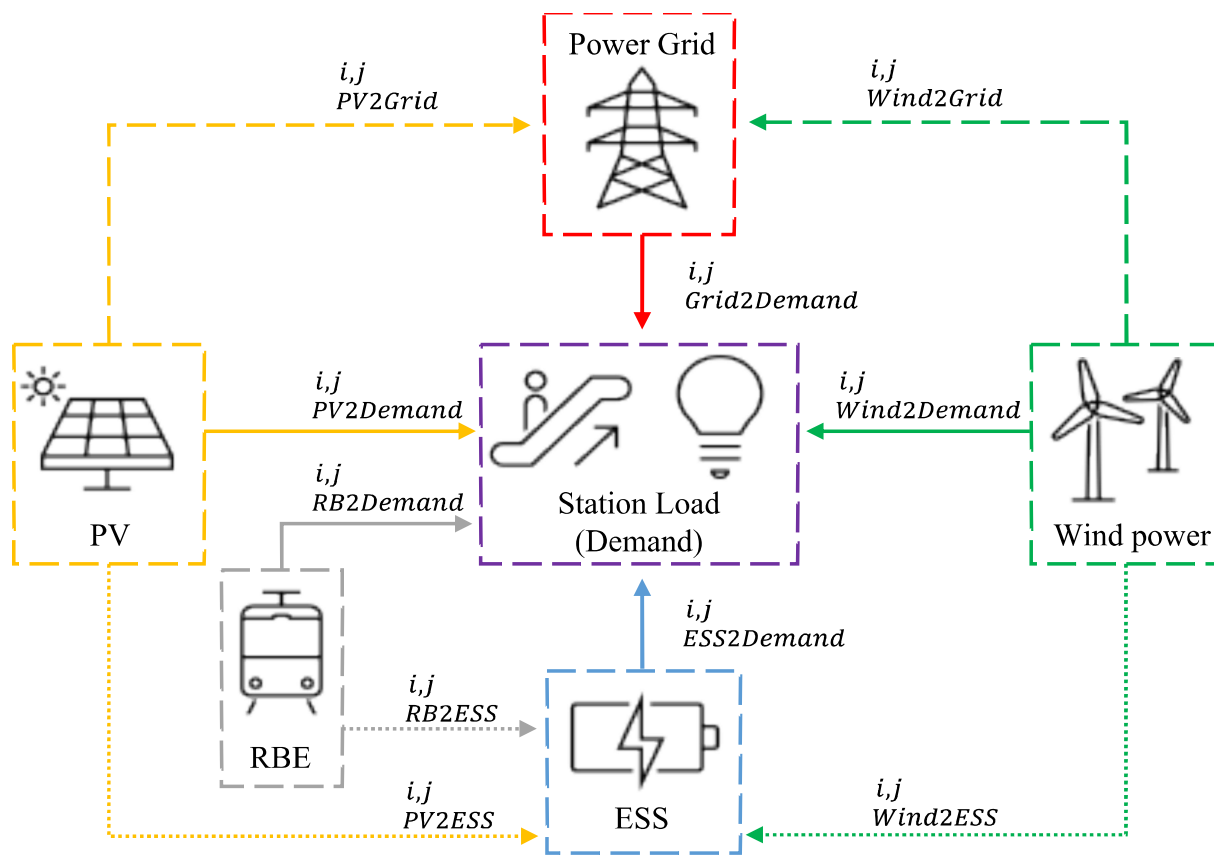


Fig. 7 The Energy Flow Model

- 1-Minute Unit Energy Flow Model
 - The optimization time unit is 1 min
- PV and Wind Power:
 - Supply energy to the station load
 - Charge the ESS
 - Sell power to the power grid
- Regenerative Braking Energy (RBE):
 - Supply station load or charge ESS
 - Non-reversible
- Energy Storage System (ESS):
 - Storage energy and supply station load
- Power Grid:
 - Supply station load or receive RES power

■ Example of input

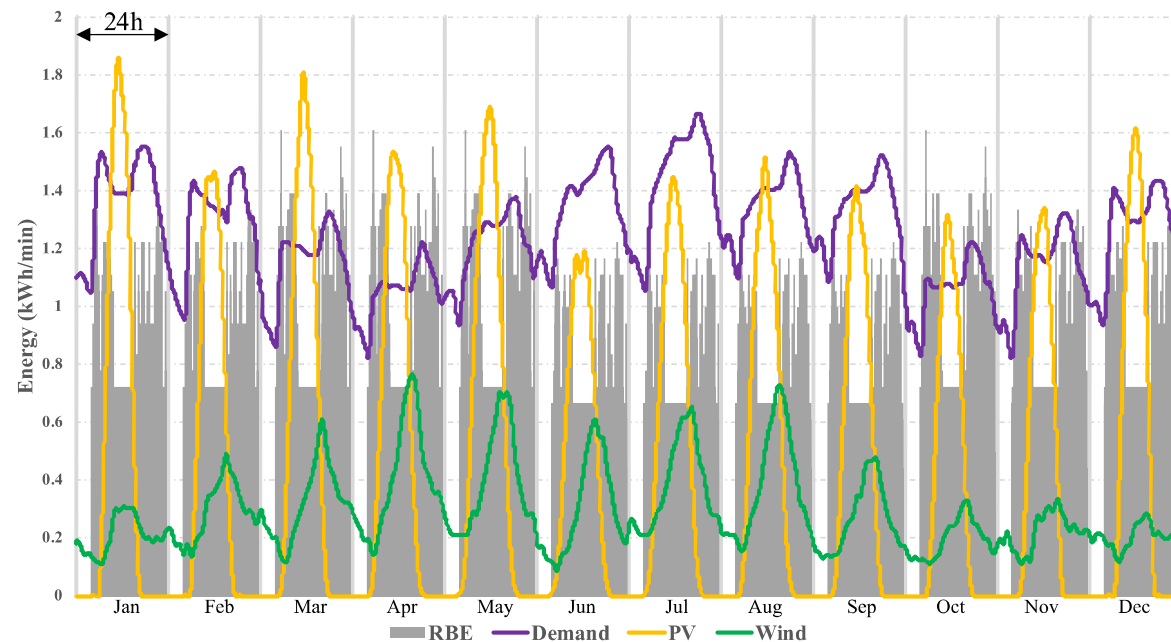


Fig. 9 Optimize RES and other input for Area B (Case 4)

- 24-hour Energy Profiles
 - **Averaged** from monthly data after optimization
 - Reflects the **impact of optimal** RES sizing instead of relying on average environmental data.
- Generation Trends
 - Wind Power: higher in spring and summer
 - PV: Maximum in May due to longer daylight hours, with a brief peak in January
- Station Demand: Peaks during summer
- RBE Variation
 - Minute-by-minute high variation

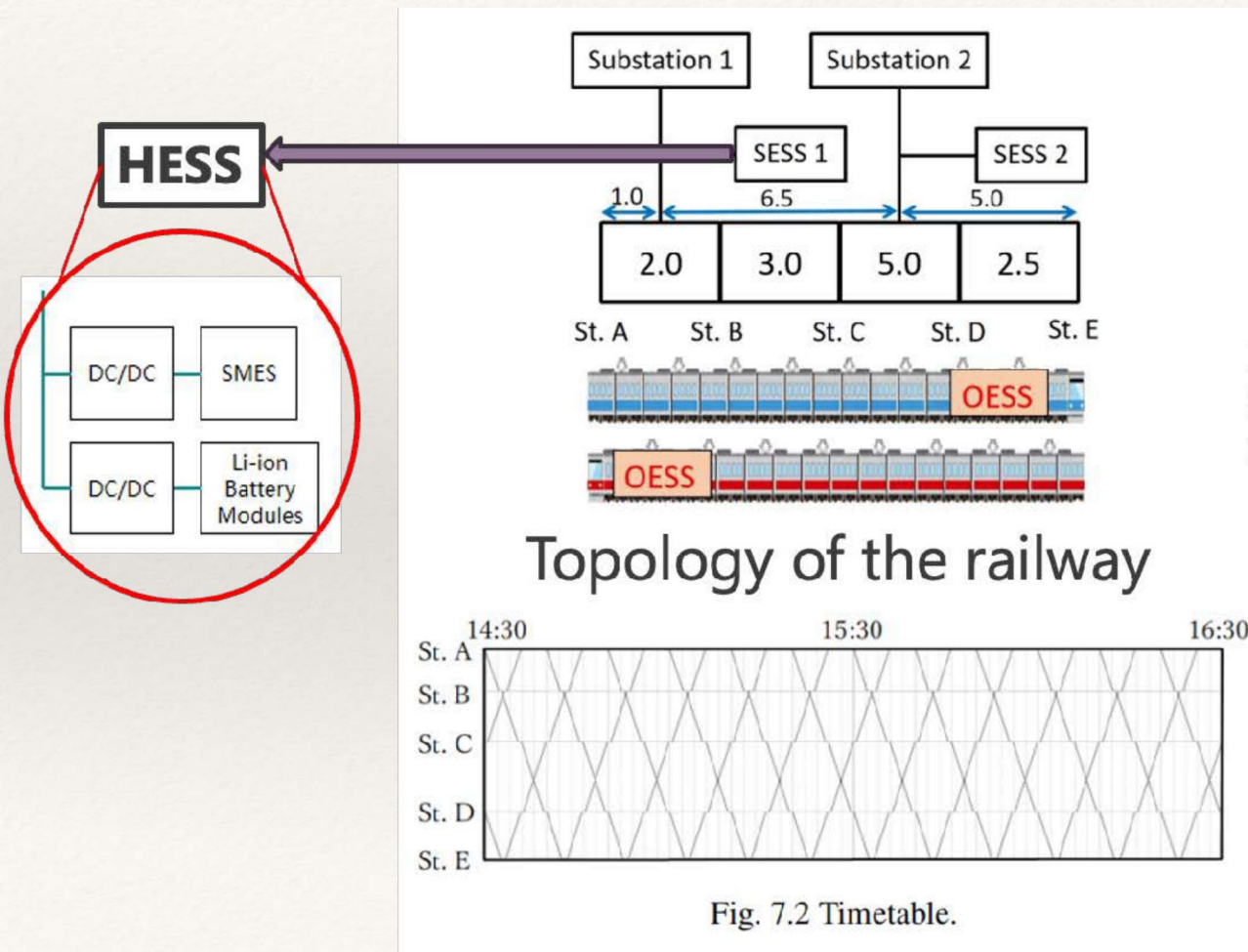
Case Studies and Analysis

■ Result of Area A

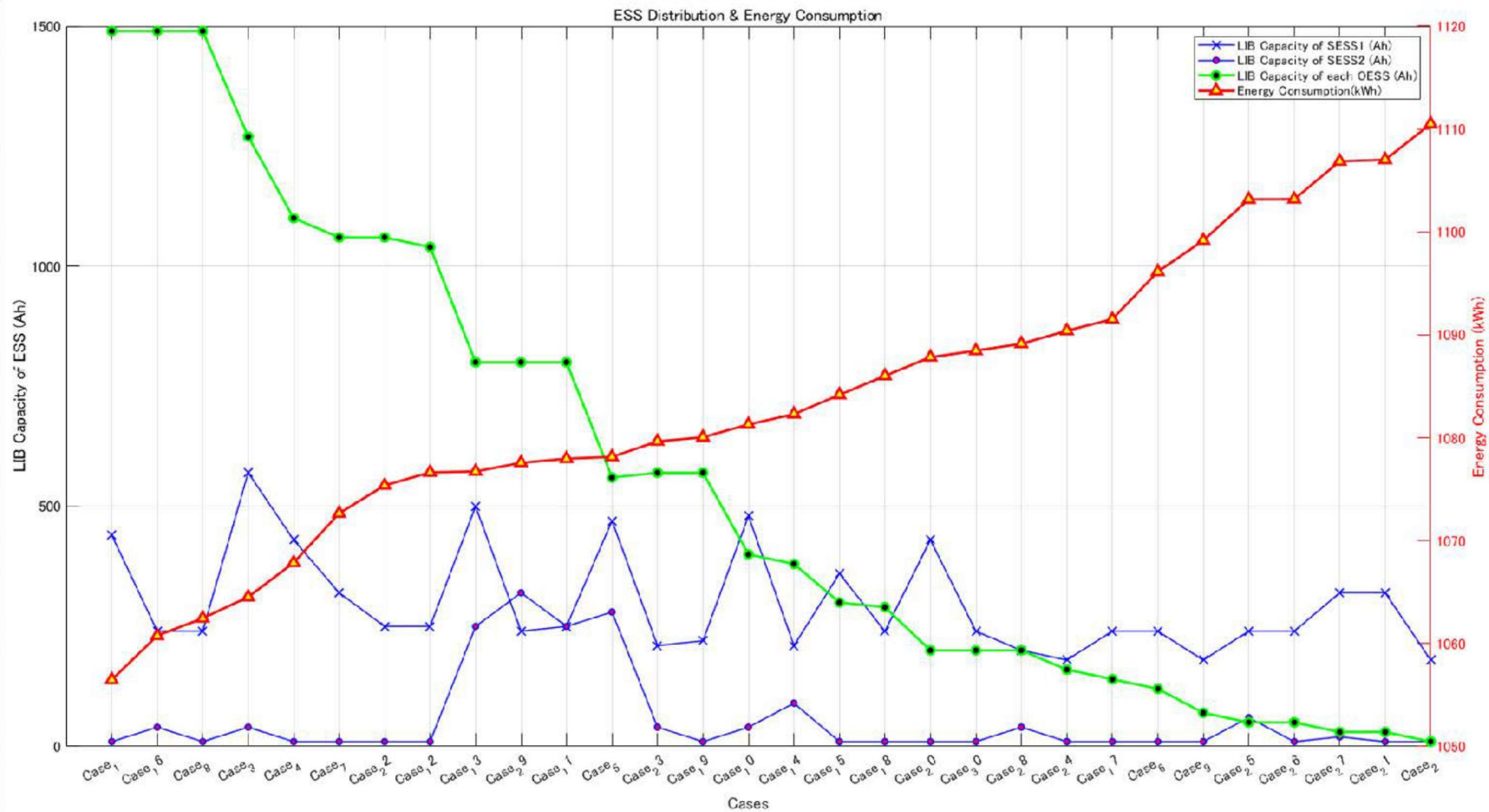
Area A	PV (kW)	Wind (kW)	ESS (kWh)	CP (kW)	Annual cost (JPY)	Grid Energy (kWh)
Case 0	—	—	—	100	15,919,475	656,558
Case A1	278.11	—	163.97	80.89 19%↓	13,793,884 13%↓	401,113 39%↓
Case A2	—	300	49.92	69.22 31%↓	11,760,566 26%↓	146,312 78%↓
Case A3	42.71	300	49.48	69.17 31%↓	11,716,697 26%↓	130,754 80%↓
Case A4	70.81	200	219.33	59.68 40%↓	10,559,822 34%↓	79,494 88%↓

- Energy and Cost Savings Improve
 - Energy and cost **savings improved** as power source **diversity** increased
- ESS Capacity Correlates with PV
 - ESS size increases with PV capacity
 - PV systems require storage due to no electricity production during **nighttime**
 - At noon, PV's output reaches its **peak**, which needs a larger storage size
- Significant ESS size Growth in Case A4
 - Due to the high **variation in RBE**, a larger ESS is needed to effectively store energy

地上と車載蓄電の協調



地上と車載蓄電の協調



おわりに

国内における社会実装の状況

- ❖ 海外では産官学がより密接に協力して数理的要素を取り入れているが、日本では非常に限られている
- ❖ 安全，安定輸送最優先
- ❖ 多部門の協調が必要で縦割りの組織に馴染まない
- ❖ 実務ベースの人間系でそこそこうまくできている
- ❖ 効果の実証が十分にできていない

今後の研究の展望

- ❖ 新たな研究のイノベーション...
 - ❖ 等増分消費エネルギー則から早15年
- ❖ 大学が研究を進めるうえで望むこと
 - ❖ エネルギーを含むデータのオープン化
 - ❖ 鉄道のオペレーションとエネルギーのベンチマーク問題の設定
- ❖ 省エネの本筋
 - ❖ 自動車から鉄道へのモーダルシフトが運輸部門の省エネ、引いてはカーボンニュートラルの本筋

さらなる課題

- ❖ 回生エネルギーの有効利用は未だ途上
- ❖ 計画通り走らせないと省エネにならない
 - ❖ 自動運転，運転支援
- ❖ レジリエンス（強靱な交通インフラ）
- ❖ 再生可能エネルギー活用によるカーボンニュートラル化
- ❖ AIによるデータドリブンな鉄道
- ❖ これらの課題に取り組んでいきたい！

ご清聴ありがとうございました

