

電気学会 交通・電気鉄道・フィジカルセンサ 合同研究会 2011年2月9日

省エネルギーな列車ダイヤ作成のための最適化モデルの導入

上智大学 理工学部 機能創造理工学科 宮武 昌史

1. はじめに

研究の背景

- ・鉄道のさらなる省エネルギー化
 - インバータ化, PMモータ化...
 - ・機器単体の対策はやがて限界に
- 鉄道システム全体での総合的な対策が将来的な検討課題
 - •特に、運転やダイヤなど、ソフトウェア的な対策

研究の目的

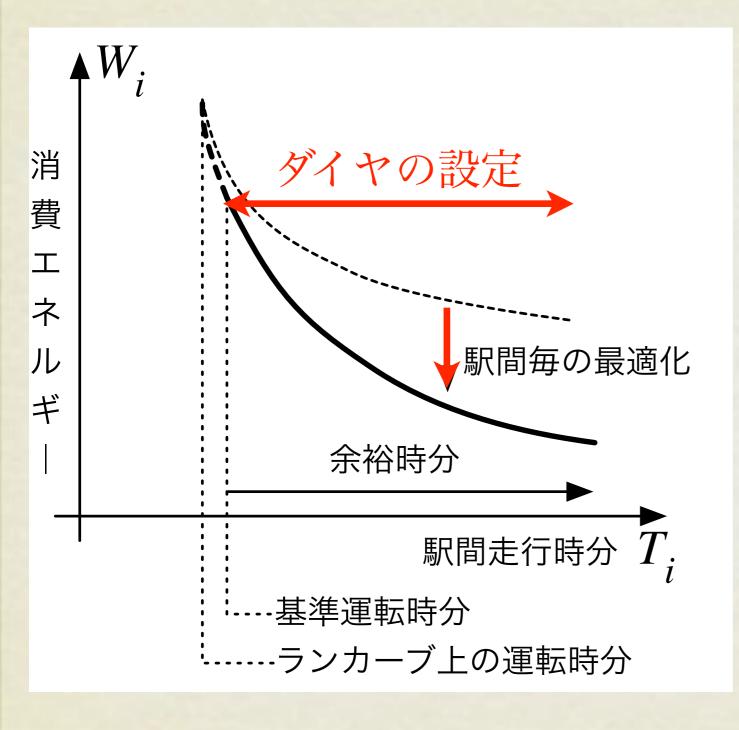
- ・省エネルギーなダイヤに着目
- 回生車と力行車のタイミングが合うダイヤ設定
 - 先行研究に散見され、ミクロな効果は絶大だが、マクロな効果や、ロバスト性に課題
- 本研究ではマクロな観点で、省エネダイヤの理論を提唱

本日の発表内容

- 1. はじめに
- 2.省エネダイヤとは
- 3.単純な条件での駅間走行時分の最適化モデル
- 4. 簡易的な数値計算による有用性検証
- 5.最適化モデルの一般化
- 6.おわりに

2. 省エネダイヤとは

運転における省エネ

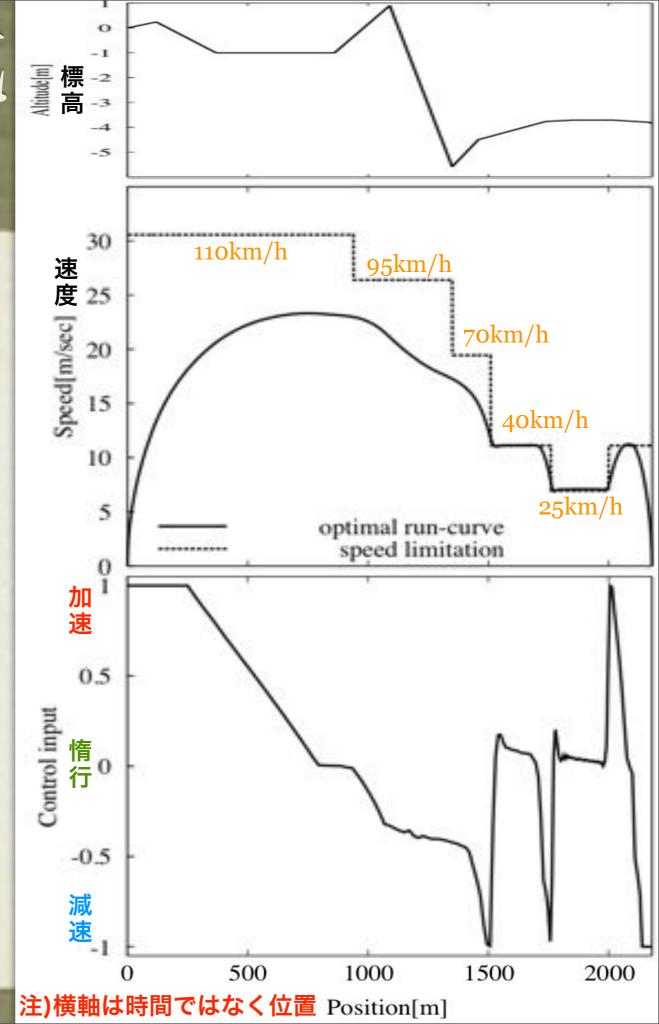


ある駅間における走行時分と 消費エネルギーとの関係

- •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

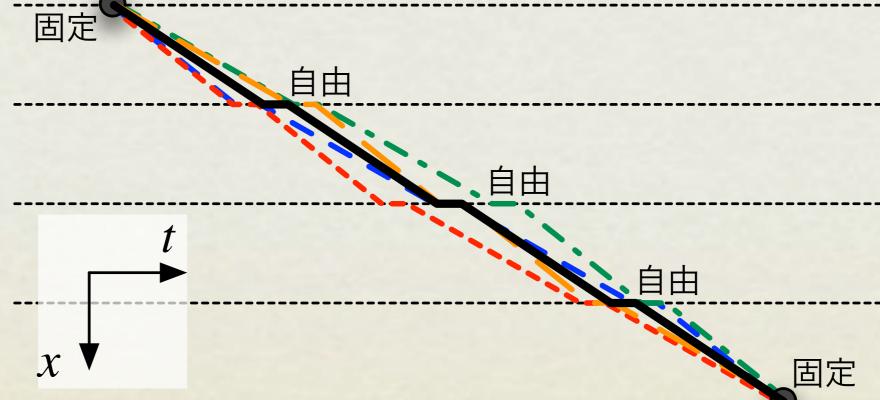
駅間毎の最適化の例

- これまでは解の導出が困難 なケースで最適化成功
 - ・低速では最大加減速
 - 高速ではゆっくりと加減速
 - ・ キツい速度制限では制限 に張り付いた運転



省エネダイヤ

- 複数駅間を含む区間の所要時間が与えられている
- 各駅間の走行時分には多少の調整の余地がある
 - 各駅間の走行条件はそれぞれ異なる
- ・最適な駅間走行時分の設定方法を提唱



3. 単純な条件での駅間 走行時分の最適化モデル

諸定義·条件

- T_i:駅間 i における走行時分 (変数)
- W_i(T_i):駅間iにおける消費エネルギー(関数)
 - T_iが決まれば決定論的に与えられると仮定
 - 傾きが単調増加するものと仮定
- Ts:全区間の総走行時分(定数)

走行時分とエネルギー

- 関数 W_i(T_i)の求め方
 - ・走行シミュレーション
 - ・標準的な運転曲線
 - ・最適な運転曲線
 - ・実測
- ・関数の善し悪しが本手法の有用性を左右

制約付非線形計画問題

$$J(T_1, \dots, T_N) = \sum_{i=1}^N W_i(T_i) \to \min \dots$$
 (1)
合計消費エネルギー
$$subject \ to \quad \sum_{i=1}^N T_i = T_S \dots$$
 (2)

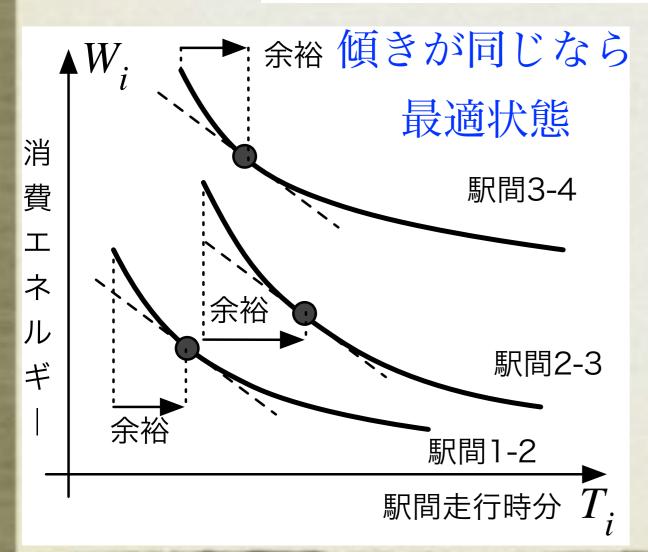
ラグランジュの未定乗数法を適用

$$L(T_1, \dots, T_N, \lambda) = \sum_{i=1}^{N} W_i(T_i) + \lambda \left(\sum_{i=1}^{N} T_i - T_S\right) (3)$$
$$\frac{\partial L}{\partial T_i} = \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \dots (4)$$

普遍的法則の導出

最終的に得られる関係式

$$\frac{\partial W_1}{\partial T_1} = \frac{\partial W_2}{\partial T_2} = \dots = \frac{\partial W_N}{\partial T_N} = -\lambda \tag{5}$$



等増分消費エネルギー則

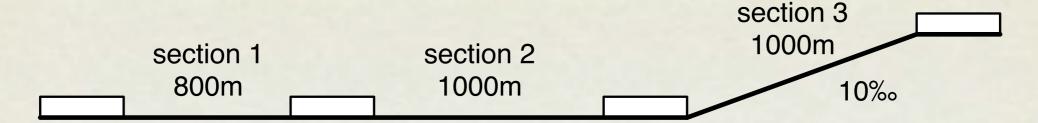
グラフ上の傾きを見て分かること

- 最適かどうか
- どの方向に動かせば改善されるか

4. 簡易的な数値計算による有用性検証

想定した条件

走行線区



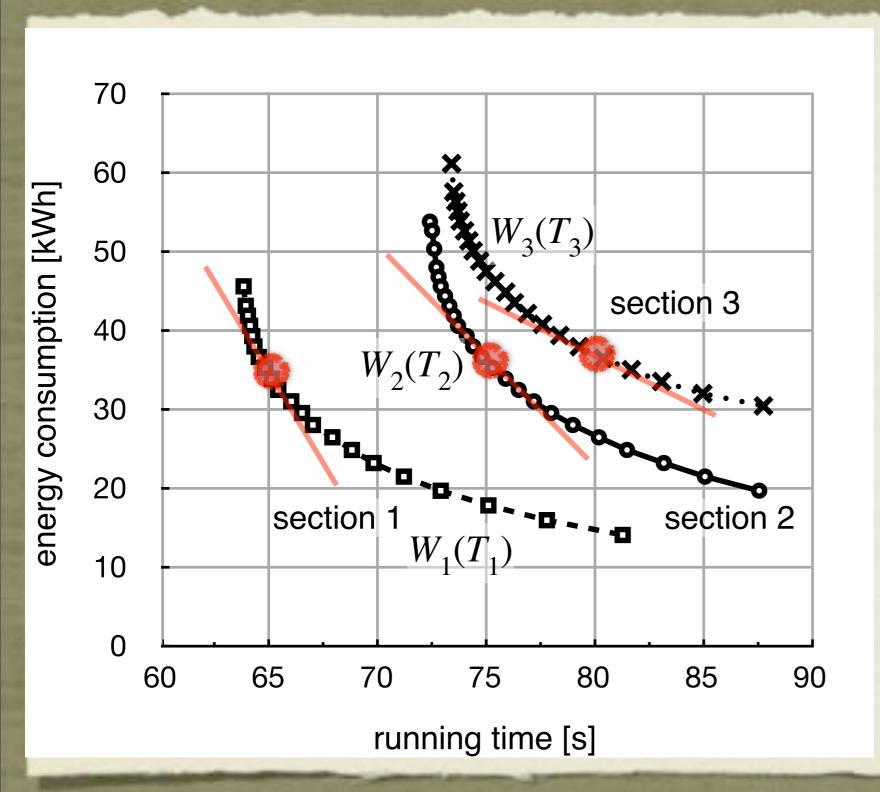
車両

10両編成の通勤型電車が最大加速・惰行・80%減速で走る計算の簡略化のため、回生ブレーキは考慮していない

駅間走行時分と消費エネルギーとの関係式 走行シミュレーションで求め,次式でフィッティング

$$T_i(W_i) = a_3 W_i^3 + a_2 W_i^2 + a_1 W_i + a_0$$

走行時分とエネルギー



初期走行時分の仮定

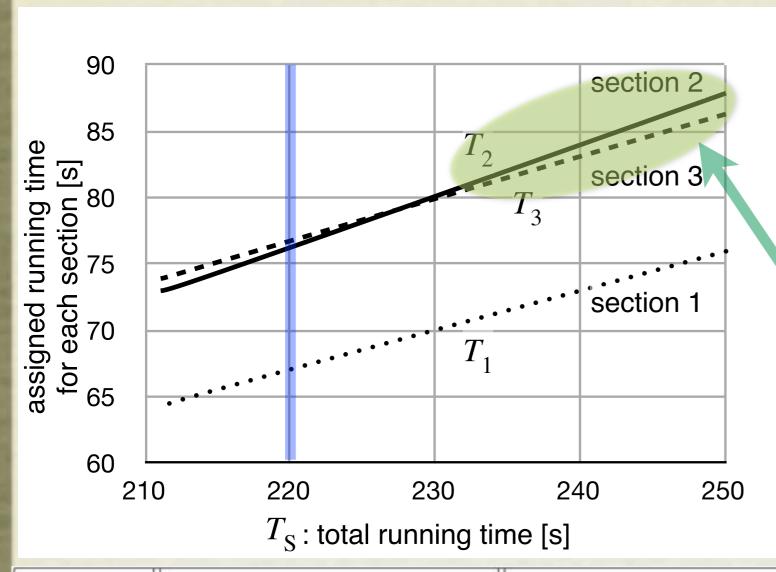
- •5秒単位に丸める
- •3駅間で5秒の余裕
 - •最もエネルギー多い section3に5秒付ける



曲線の傾きがバラバラ

→最適ではない

駅間走行時分の最適分配



等増分消費エネルギーと なる駅間走行時分を導出

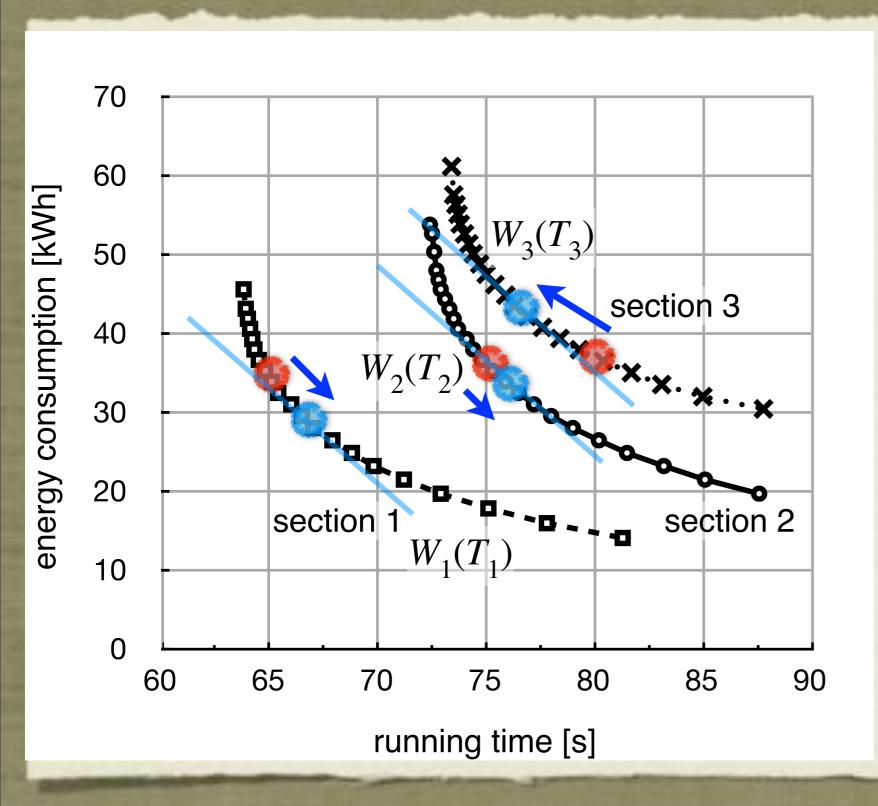
逆転:

上り勾配の方を速く走る

4.07%の省エネ

| | section 1 | | | section 2 | | | section 3 | | | total |
|-----------|-----------|-------------|-------------------------------------|-----------|-------------|-------------------------------------|-----------|-------------|-------------------------------------|---------|
| type | T_1 [s] | W_1 [kWh] | $\frac{\partial W_1}{\partial T_1}$ | T_2 [s] | W_2 [kWh] | $\frac{\partial W_2}{\partial T_2}$ | T_3 [s] | W_3 [kWh] | $\frac{\partial W_3}{\partial T_3}$ | W[kWh] |
| | 65.000 | 34.154 | | 75.000 | | | 80.000 | 37.013 | -1.236 | 106.924 |
| optimized | 67.045 | 27.639 | -2.118 | 76.230 | 32.737 | -2.118 | 76.726 | 42.194 | -2.118 | 102.570 |

等増分消費エネルギー則



最適な駅間走行時分

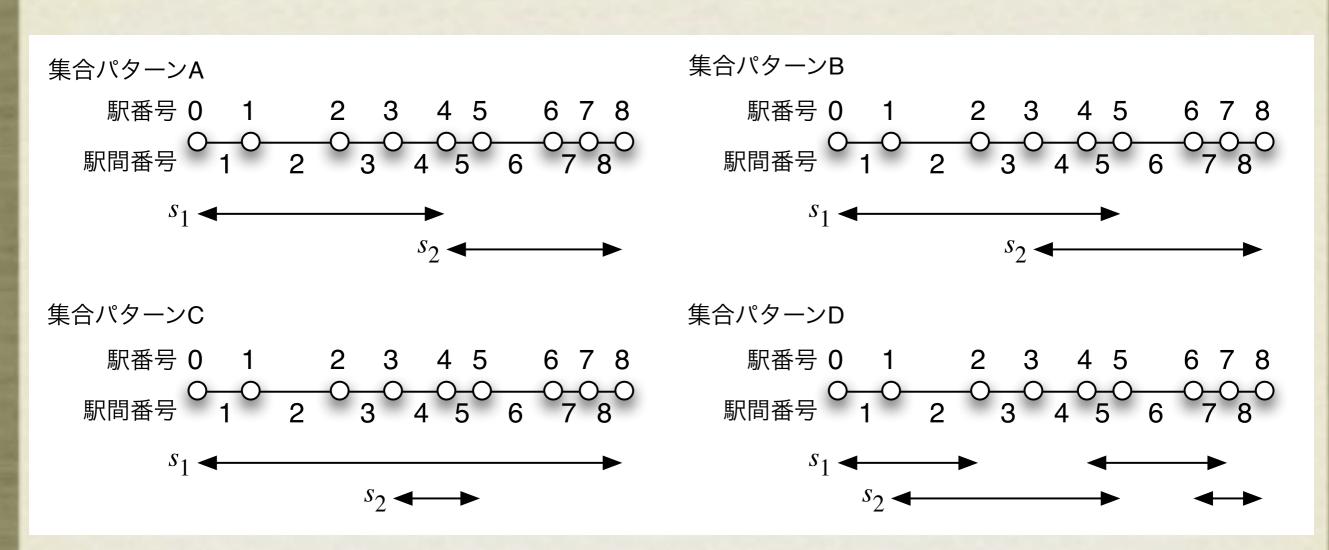
- •増分が同じ
- ・エネルギー消費が同じ とは限らない

数値計算で分かったこと

- 1~3秒の調整で、4.07%の省エネルギー化
- 現状では、1~3秒レベルの駅間走行時分の管理は困難
 - 今回は、単純で駅間の短い路線を対象としたため
 - 複雑で長い路線では調整幅が大きくなると考えられる

5. 最適化モデルの一般化

所要時間を与える複数区間の定義



柔軟な区間の与え方を前提とする

所要時間は固定値を与えるのではなく, 幅を持たせる

一般化された最適化モデル

複数の線形な不等号制約からなる非線形最適化問題

$$J(T) = c \ W(T) \rightarrow \min \cdots \cdots (20)$$

 $subject \ to \ T_S^{\min} \leq AT \leq T_S^{\max} \cdots (21)$
 $T^{\min} \leq T \leq T^{\max} \cdots (22)$

要点:複数区間の所要時間の範囲を与える 各駅間の所要時間の範囲を与える

汎用の最適化ソフトウェアを利用可能 制約条件が全て線形なら問題の性質上解きやすい

未定乗数の意味

1変数の時と同様に...

$$L(T, \lambda) = c W(T) + \lambda (AT - T_S) \cdots (27)$$

$$\frac{\partial L}{\partial T} = 0 \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \cdots (28)$$

$$\therefore c \frac{\partial W}{\partial T} = -\lambda A \tag{30}$$

λはTsに対する感度を与える

どの $T_{S_{-j}}$ を増やせば最も消費エネルギーを削減できるかが分かる λ を指標として T_{S} を調整できる

6. おわりに

まとめ

• 成果

- 省エネダイヤ理論を提唱
 - 等増分消費エネルギー則
- 簡易な事例で約4%の省エネ効果確認

• 課題

- ・より複雑な事例の解析による有効性検証
- ・より現実的な条件の反映
 - ・利用者の効用,電力供給 etc.