運転時間の簡略計算法を用いた新幹線各駅停車 列車省エネルギー運転制御システムの開発

正員 保 川 忍 (鉄道技研)
正員 藤 田 信一郎 (国 鉄)

1. ま え が き

鉄道車両、なかでも高速運転を行っている新幹線車両の動力費の節減は重要な課題である。このため筆者らは、さきに新幹線各駅停車列車について、運転方法の工夫によって動力費の節減を図る省エネルギー運転法の検討を行い、一つの運転方式の基本的な考え方を提示した⁽¹⁾。

本論文では、この運転方法を実現するための方法について、まず検討を加えている。列車の運転では、次駅に定刻どおりに列車を到着させること（定時運転制御）が重要である。ところで、現実には種々の要因によって、車両の基本性能どおりの運転が行われることはほとんどあり得ない。そこで実時間制御として、車両性能の変動などを吸収して良好な定時運転精度を維持しつつ、省エネルギー運転を可能とする現実的な運転制御方式を提案している。この場合に重要になるのが、列車の次駅到着までの運転時間の予測計算を短時間で精度良く行うことである。このために、基本的には線路こう配の変化点ごとの計算ですむ一つの運転時間の簡略計算法を提案している。本計算法によれば、マイクロコンピュータを用いても実用上十分な計算精度で、かつ短時間に運転時間の予測計算が可能である。

更に、実際にマイクロコンピュータを使用した本計算法による運転制御システムを、乗務員の運転を支援するという形態で構成し、東北新幹線において本システムによる走行試験を実施した。その結果、試運転

ダイヤによる走行ではあったが、乗務員の運転などに比べて、さきに提案した運転方式によって大きな省エネルギー効果が得られた。また、本制御システムによって良好な定時運転制御が可能であることが明らかになった。

2. 実用的な省エネルギー運転制御方式⁽²⁾

〈2・1〉 提案する省エネルギー運転法の基本的な考え方 図1に示すような運転方法を考える。列車の出し得る最大の駆動力を発生した状態での力行、すなわち最大力行によって、速やかにその駅間の最高運転速度 v_0 まで加速する。 v_0 に達すると、この速度を維持する定速運転を行い、図示の地点 a において惰行（列車が駆動力もブレーキ力も発生しないで、慣性によって走行している状態）運転に移行する。ところで、新幹線においては、自動列車制御装置（ATC: Automatic Train Control）による運転が行われていて、列車速度が ATC の指示する速度、すなわち ATC 信号速度以上になると、ATC ブレーキと称する通常使用し得る最も強いブレーキ（最大ブレーキ）が作用して、列車速度を信号速度以下に下げる制御が行われる。そして図示のように、停車駅近傍で順次低い信号速度が列車に指示される。そこで、地点 a で惰行した

図1 提案する省エネルギー運転の方法

Fig. 1. Proposed energy saving train operation method.

Development of an Energy Saving Train Operation System for the Shinkansen Accommodation Train Service Using an Approximate Calculation Method of Train Operation Time. By Shinobu Yasukawa, Member (Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways), Shin-ichiro Fujita, Member (Rolling Stock & Mechanical Engineering Department, JNR Head Office).

保川 忍: 正員, 鉄道技術研究所〔現在, 鉄道総合技術研究所車両研究室〕

藤田信一郎: 正員, 国鉄車両設計課〔現在, 東海旅客鉄道(株)浜松工場〕

図2 Δt - v_0^* 特性の計算例

Fig. 2. Example of Δt vs. v_0^* characteristics.

後、惰行と ATC ブレーキによる減速を繰返し、最後に ATC ブレーキより弱いブレーキ力の停止ブレーキによって駅の所定の位置に停車させる。

この運転方式の場合、運転時間が T となる v_0 と惰行地点 a の組合せは無数に考えられる。そこで、文献(1)に示すようにして求めた運転エネルギーが最小となる速度 v_0^* を v_0 として選択する。 v_0^* は運転時間に応じて変化するが、これを幾つかの駅間について、運転時間と基準運転時間（営業運転時間を求める基準になる時間で、通常の運転状態での最も短い時間を意味する）の差、すなわち余裕時間 Δt との関係として図示したのが図2である。そこで、駅間ごとに同図に示したような運転時間と v_0^* の関係を用意しておき、駅発車時に次駅までの残り時間に応じて適切な v_0^* を選択し、これをその駅間の最高運転速度として、図1に従った運転を行う。このような運転方法を用いると、そのときの運転状況に対応して常に運転エネルギーがほぼ最小となる運転が行われることになる。

ところで、定速運転の方法としては、上述のように目標速度での走行抵抗に等しい駆動力を発生させて定速走行させる方法（方式1）のほかに、完全な定速走行とはならないが、目標速度を中心に Δv の速度幅で最大力行と惰行の繰返しによる方法（方式2：図3参照）が考えられる。図3は、目標速度 $v_p=200$ km/h の場合について、方式1と2の単位長さあたりの運転エネルギーの比較をした例である。力学エネルギーについては目標速度のいかんにかかわらず、走行抵抗が二次関数で表されることから、常に方式1のほうがエネルギーが小さくなっている。しかし、直流主回路（主電動機回路）入力エネルギーについてみると、図示のように Δv を大きくとらない限り、200 km/h までの定速運転では、主回路損失の影響の少ない方式2のほうが小さくなっている。しかしその差は僅少で、

図3 二つの定速運転法についての単位長さあたりの消費エネルギーの比較

Fig. 3. Comparison of train operation energy per meter between two constant speed control methods.

例えば方式2で $\Delta v=2$ km/h, $v_p=180\sim 200$ km/h の場合の方式1とのエネルギー差は、定速運転距離の長い大宮-小山間においても全体エネルギーのたかだか0.5%程度である。しかもこの場合、最大力行と惰行が頻繁に繰返されることになり、乗心地が悪くなり好ましくない。そこで、方式1の定速運転法を用いることを原則としている。

〈2.2〉 現実的な省エネルギー運転制御方式

上記運転法を実現する方法としては種々考えられるが、実時間制御によって加速性能や定速運転性能の変動の影響を吸収し、定時運転精度を維持し得るようにした下記の運転制御方法をとることにした。

すなわち、図1に示すように、駅発車時に選択した最高運転速度 v_0^* まで最大力行により加速した後の定速運転中において、一定時間間隔ごとに現在地点から惰行して、それ以降惰行と ATC ブレーキによって減速し、最後停止ブレーキによって停止するした場合の運転時間を予測計算する。そして、次駅へ定時到着可能との予測計算結果が得られた地点で実際に惰行し、それ以降、惰行と ATC ブレーキによる減速運転に移行する。

ところで新幹線の場合、惰行運転による走行が非常に長くなることから、上記の制御をする場合、運転時間の予測計算を短時間で精度良く行うことが必要になる。この運転時間の予測計算には、次章で述べる簡略計算法が計算時間、精度の面で有効である。

3. 運転時間の簡略計算法

〈3.1〉 運転時間、距離、速度の簡略計算式

線路こう配が一定であるとして、列車の運動方程式

を(1)式で表す。ここに v : 速度, t : 時間, $f_{dr}(v)$: 走行抵抗, こう配抵抗, 更にブレーキの場合にはブレーキ力を含めた列車が受ける全抗力(単位質量あたり)を表している。また, a, b, c は惰行, ブレーキなどの運転モードによって異なり, c の中にこう配抵抗が含まれている。

$$dv/dt = f_{dr}(v) = av^2 + bv + c \quad (1)$$

$t=0$ で列車位置 $x=0$, $v=v_x$ として(1)式を線形化すると, (2)式を得る。

$$dv/dt = Av + B \quad (2)$$

$$A = f_{dr}'(v_x) \quad (3)$$

$$B = f_{dr}(v_x) - v_x f_{dr}'(v_x) \quad (4)$$

$$f_{dr}'(v_x) = 2av_x + b \quad (5)$$

(2)式を解くと,

$$v = (v_x + B/A) \exp(At) - B/A \quad (6)$$

$$x = 1/A \cdot (v_x + B/A) \exp(At) - B \cdot t / A - (v_x + B/A) / A \quad (7)$$

$$t = 1/A \cdot \ln \{ (v + B/A) / (v_x + B/A) \} \quad (8)$$

(6)~(8)式から

$$x = (v - v_x) / A - B/A^2 \cdot \ln \{ (v + B/A) / (v_x + B/A) \} \quad (9)$$

対数項を級数展開して二次の項までとって, (8), (9)式から v, x, t に関する(10)~(12)式に示す近似式を得る。

$$v = \sqrt{v_x^2 + 2Bx} + v_x / (B/A) \times (-v_x + \sqrt{v_x^2 + 2Bx}) \quad (10)$$

$$x = (B/2A^2) \{ (v - v_x) / (v_x + B/A) \}^2 + (v_x/A) \{ (v - v_x) / (v_x + B/A) \} \quad (11)$$

$$t = 1/A \cdot \{ (v - v_x) / (v_x + B/A) - 1/2 \times \{ (v - v_x) / (v_x + B/A) \}^2 \} \quad (12)$$

定数 A, B は, こう配, トンネルや運転モードによって異なるので, これらに対応した A, B を用いて(10)~(12)式を基に運転時間を求めていく。

〈3・2〉 列車長の影響の考慮 以上においては列車を質点とみなしたが, 新幹線のように列車が長い場合には, 線路こう配が変化する近傍においては, 列車長を考慮したこう配抵抗を用いることが必要となる。

いま, 図4(a)に示すように, 長さ l の列車の先頭が, こう配変化点から x のところにある場合を考える(ただし, $x \leq l$ とする)。列車を一様分布荷重とみなすと, この場合の等価こう配 R_{eq} は(13)式によって与えられる。

$$R_{eq} = 1/l \cdot \{ x RR_2 + (l-x) RR_1 \} \quad (13)$$

ここに RR_1, RR_2 は図4に示すように, こう配変

図4 こう配変化点近傍における等価こう配と仮想のこう配区間

Fig. 4. Equivalent gradient at the vicinity of the point where the slope changes and virtual slopes.

化点前後の区間のこう配を表している。この等価こう配は, $0 \leq x \leq l$ の範囲で図4(b)に示すように変化する。列車の先頭が x_1 から x_2 まで移動するとき, 区間 (x_1, x_2) における平均こう配 R_{av} は, x_1 と x_2 における等価こう配の平均値として(14)式のように表される。

$$R_{av} = \{ (x_1 + x_2) RR_2 + (2l - x_1 - x_2) RR_1 \} / 2l \quad (14)$$

ただし, $0 \leq x_1 \leq x_2 \leq l$

このように, こう配変化点から先方列車長 l までの区間については, 列車は等価的には(13)式で与えられるこう配に相当するこう配抵抗を受けることになり, しかも列車位置によって変化する。従って, 前節で述べた方法によって運転時間の計算ができるようになるためには, この部分については特別な配慮が必要になる。そこで, 図4(a)に斜線で示すように, 本来のこう配区間のほかに, この部分を長さ l の仮想のこう配区間として追加する。そして, (14)式で与えられる平均こう配をこの区間のこう配と考えると, この仮想こう配区間を含めたこう配変化点ごとに運転時間の予測計算を行うようにすれば, この部分についても前節で述べた方法で統一的に取扱うことができるようになる。

〈3・3〉 運転時間の計算方法 (2)式の A, B は同一の運転モードでも, こう配やトンネルによって異なる。また, ATC 信号速度の変化予定地点において, 運転モードが惰行から ATC ブレーキモードに変化することが考えられる。そこで, 前記の等価こう配区間を含めたこう配変化点, トンネルの出入口, ATC 信号速度変化予定地点ごとに運転時間を求めていく。

まず, 現在地点 x_1 より先方で, こう配変化点, トンネル入口または出口, ATC 信号速度変化予定地点のうちで最も近い地点 x_2 を選択して, 計算区間長を

定める。そして x_1, x_2 が等価こう配区間内にあるか否かによって、次の五つのケースのなかから平均こう配 R_{av} を求める (図5参照)。

(1) ケース I 等価こう配区間内 (図5(a))

$$R_{av} = \{x_s R_{eff}(j_k+1) + (2l-x_s) \times R_{eff}(j_k-1)\} / 2l \dots\dots\dots (15)$$

$$x_s = x_2 - S_{eff}(j_k-1) \dots\dots\dots (16)$$

(2) ケース II 等価こう配区間内 (図5(b))

$$R_{av} = \{(l+x_i) R_{eff}(j_k+1) + (l-x_i) R_{eff}(j_k-1)\} / 2l \dots\dots\dots (17)$$

$$x_i = x_1 - S_{eff}(j_k-1) \dots\dots\dots (18)$$

(3) ケース III 等価こう配区間内 (図5(c))

$$R_{av} = \{(x_i+x_s) R_{eff}(j_k+1) + (2l-x_i-x_s) \times R_{eff}(j_k-1)\} / 2l \dots\dots\dots (19)$$

(4) ケース IV 等価こう配区間内 (図5(d))

$$R_{av} = \{R_{eff}(j_k+1) + R_{eff}(j_k-1)\} / 2 = R_{eff}(j_k) \dots\dots\dots (20)$$

(5) ケース V 等価こう配区間外 (図5(e))

$$R_{av} = R_{eff}(j_k) \dots\dots\dots (21)$$

ただし、 $S_{eff}(j_k), R_{eff}(j_k)$ は j_k+1 番目のこう配区間の入口の地点、 j_k 番目のこう配区間のこう配をそれぞれ表している。

このようにして求めた R_{av} を用い、運転モード (惰行または ATC ブレーキ)、トンネル外か内かに応じ

た A, B を計算し、(10)式によって地点 x_2 における速度 v_1 を、次いでこの v_1 を用いて(12)式によって区間 (x_1, x_2) の運転時間を求める。なお、 v_1 が図6に示すように、その区間の上限速度 v_{11} (通常は ATC ブレーキが緩解する速度にとる) を超す場合には、 v_{11} までの走行距離、時間を(11), (12)式を用いて計算し、 v_{11} に達した後は x_2 まで抑速ブレーキによって速度が v_{11} に保たれるものとして時間を計算する。 x_2 が ATC 信号速度変化予定地点でない場合には、 x_2 を x_1 に置き換えて上記の手順で次の区間の計算を行う。 x_2 が ATC 信号速度変化予定地点である場合には、次の信号速度区間の v_{11} と v_1 との比較を行う。 $v_1 \leq v_{11}$ の場合には上記の惰行モードの計算を繰返す。 $v_1 > v_{11}$ の場合には、ATC ブレーキモードとしてブレーキ減速中における運転時間の計算を行う。ブレーキモードでは図7に示すように、現在計算を行う予定の区間が無限に続くものと仮定して (実際には $x_2 \sim x_1$ 間)、 v_{11} までの減速距離 x_{br} を計算し、これが x_2 より先方にくる場合には、計算区間を更新してブレーキモードの計算を繰返す。 x_{br} のほうが手前になる場合 (図7中の x_{br}' と x_2' の関係)、この時点でブレーキモードの計算を終了し、再び前述の惰行モードの計算に移行する。

以上の計算を繰返し、最後停止ブレーキを作用させる地点まできたら、停止ブレーキモードの計算を行っ

図5 平均こう配計算の場合分け
Fig. 5. Several cases of effective gradient calculation.

図6 途中で上限速度を越す場合の時間計算
Fig. 6. Calculation of the time in case of the calculated speed exceeding the upper speed limit.

図7 ATC ブレーキ中の予測計算
Fig. 7. Calculation of the time in ATC braking.

て予測計算を終了する。

〈3・4〉 計算精度と計算時間 上記計算方法(方式 A)の計算精度をチェックするため、東北新幹線大宮以北の 14 駅間(下り)について、駅間距離の短い駅間は駅手前 10 km の地点から速度 170 km/h で、その他の駅間については駅手前 15 km の地点から速度 190 km/h で惰行した場合の運転時間を計算した。また、ルンゲクッタ法(方式 B)で惰行運転中における計算刻みを 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 秒と変えた場合についても計算した(ただし、ブレーキ中は速度変化が大きくなるので 0.1 秒に固定した)。計算は(22)式で与えられる運動方程式によっている。

$$dv/dt = -G(v) - f_d(v) - R_0(x) \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 $G(v)$ はブレーキモードのときにはブレーキ力を表し、惰行モードでは $G(v)=0$ とする。 $f_d(v)$ は走行抵抗であり、トンネル内と外とで同一速度における値が異なる。 $R_0(x)$ はこう配抵抗を表している。そして、こう配変化点から先方列車長 l までの区間については、(13)式で与えられる等価こう配を用いてこう配抵抗を求める。なお、これらの諸量は単位質量あたりで表現されている。

図 8(a)は、方式 B の 0.1 秒刻みの運転時間計算結果との差の絶対値を、計算誤差として図示したものである。方式 A の計算精度は、方式 B の 0.5~1.0 秒刻みの場合と同程度で、計算誤差の平均値が 1.0 秒以下と実用上十分な計算精度になっている。上記の計算結果は 32 ビット浮動小数点演算によっている。実時間制御においても同じ演算を行うことが必要となるので、32 ビット浮動小数点演算が可能な、例えば Am 9511 A 相当の演算プロセッサを用いることを想定して、図 8(a)に示した計算を行うに必要な時間を求めてみた。図 8(b)がその結果であるが、平方根と四則演算回数を数え、表 1 に示す演算時間を基に算出したものである。方式 B では、計算刻みを 2.0 秒にしても平均 8.6 秒の計算時間となっていて、実時間制御には使えないのに対し、方式 A はたかだか 0.5 秒以下であり、十分実時間制御が可能であると言える。実際には上記演算のほかに、条件判定やレジスタへのデータのセット、転送など種々の命令が実行されるのであるが、四則演算などに比して無視し得る程度であるので考慮に入れていない。

なお、これらの演算方式のほかに、距離を独立変数にとって運動方程式を逐次解いていく方法⁽³⁾もあるが、計算精度を方式 A と同程度とすると、計算時間の面で方式 B と同様の状況となる。以上の検討結果より、前述の簡略計算法が、計算精度、時間の両面で十分実

図 8 簡略計算法とルンゲクッタ法の計算精度、計算時間の比較

Fig. 8. Comparison of calculation error and time between the approximate calculation and Runge-Kutta methods.

表 1 演算プロセッサの命令実行時間

Table 1. Instruction operation time of arithmetic processor.

演 算 種 別	実 行 時 間 (μs)
加 算	184
減 算	185
乗 算	84
除 算	92
平 方 根	435

(32 ビット浮動小数点演算)

時間制御に適用可能であることが明らかになった。

4. 運転制御システムの構成

前述の省エネルギー運転制御方式と、乗務員の運転とで、どの程度電力消費量が異なるかを本線走行試験によって調査するため、運転制御システムを開発した。図 9 にこのシステムの構成を示す。本体には 8 ビットマイクロコンピュータと、32 ビット浮動小数点演算が可能な演算プロセッサを用いている。入力情報は、速度、距離の演算に必要な速度発電機出力パルス、車輪直径、出発地点を把握するための始発駅コード、力行指令などである。出力情報は、駅間の最高運転速度の目標値(以下、目標速度と記す)、現在速度、どの地点で惰行すればよいかを乗務員に知らせる惰行指令がある。本システムでは、提案方式のほかに、文献(1)に記載の方式 A(図 10 参照)の運転制御機能も併せて有している。いずれの運転方式においても、駅発車後システムから示される目標速度に従って定速運転を乗務員が行い、提案方式においては、更に惰行すべき地点になると惰行知らせ灯を点灯させ、その地

図 9 運転制御システムの構成

Fig. 9. Composition of the train control system.

図 10 運転制御システムに組み込まれているもう一つの運転方式

Fig. 10. Another train operation method implemented in the train control system.

点から実際に惰行してもらうという、乗務員の運転が行いやすいようにシステムが支援する形態とし、完全な自動運転方式は採用しなかった。

5. 本線走行試験結果とその考察

上記運転制御システムを用いて、乗務員の運転（方式Ⅰ）、図10に示した運転（方式Ⅱ）と省エネルギー運転方式（方式Ⅲ）について、本線走行試験を実施して、電力消費量の調査を行った。

〈5・1〉 試験方法 試験は東北新幹線下り大宮-盛岡間の14駅間で、925 S2形電気軌道総合試験車（電動車6両、付随車1両の7両編成）に運転制御システムを搭載して実施した。方式Ⅰについては、運転操縦についての要請はいささい行わずに、ふだん通りの運転を行ってもらった。方式ⅡとⅢについては、加速は最大力行（10ノッチ*1での加速）、定速運転においては、下りこう配区間の走行によって列車速度が目標速度を上回ることがあっても、ATCシステムによる強い抑速ブレーキが作動する速度に接近しない限り、抑速ブレーキは作用させないように要請した。ところで、定速運転中に下りこう配で惰行しても加速し、目標速度より高い速度になることがあっても、そのまま

惰行走行を維持すれば、次の平坦区間や上りこう配区間において、その分だけ力行しなければならない割合が少なくなる。従って、長い連続下りこう配区間において、惰行走行によってATC信号速度に近い速度になった場合や、目標速度がATC信号速度に非常に近い場合を除いて、このような区間は抑速ブレーキを作用させないようにし、惰行走行を行うのが省エネルギーの面から好ましい。また長い下りこう配区間についても、早めに惰行走行に移行し、抑速ブレーキをかけなければならないケースを極力減らすように努める必要がある。このような観点から、定速運転に関する上記の要請を行った。

また、方式Ⅲにおいては、惰行知らせ灯が点灯した時点から惰行し、それ以降列車速度が30 km/h以下になるまでは、原則として再力行しないように要請した。また、方式Ⅱでは図10に示すように、最大力行による加速中に、現在速度を最高運転速度として運転した場合の運転時間の予測計算を制御システムが時々刻々行い、定時到着可能な速度に達した時点で、その速度を乗務員に表示器によって目標速度として指示し、それ以降その目標速度に従った定速運転を行ってもらった。

〈5・2〉 試験結果と考察 表2に試験結果を示す。表中の計画運転時間は、試験列車の運転ダイヤで指定された駅間運転時間の計画値を表す。また電力消費量は、一つの主回路ユニットについての計測結果であり、一次側電力消費量は、主変圧器一次巻線側で計測したその主回路ユニットへの全入力エネルギーを、二次側電力消費量は二次巻線側のそれを表しており、ほぼ直流主回路への入力エネルギーに相当している。表には、臨時に速度制限が設けられ徐行運転を余儀なくされたなどのため、走行条件の整わなかった3駅間については結果を記載していない。

（1） 定時運転精度 定時運転精度（＝実際運転時間－計画運転時間）の絶対値の平均では、方式Ⅰ：25秒/駅、方式Ⅱ：19.3秒、方式Ⅲ：9.3秒、早着・延着を考慮した平均値では、それぞれ-24.3、-14.0、-1.9秒となっていて、方式Ⅰの現状運転では精度が良くなく、しかも全般的にかなりの早着運転となっていることがわかる。方式Ⅱについては、大宮-小山間、小山-宇都宮間において、運転ダイヤに関するデータの不備で大幅早着となっているが、それ以外は定時運転精度の目標値*2である±15秒の範囲にほぼ入っている。また方式Ⅲについては、郡山-福島間、福島-白

*1：一般に駆動力やブレーキ力は離散値で指令されるが、この離散値の刻みをノッチという。

*2：列車ダイヤは15秒単位で設定されているので、定時運転精度もこの範囲内に維持することを目標とした。

表 2 走行試験結果 (東北新幹線, 下り, 大宮-盛岡間)

Table 2. Running test results between Ohmiya and Morioka on the Tohoku-Shinkansen line (down direction).

運転方式		方 式 I				方 式 II				方 式 III			
駅 名	計画運転時間 (分-秒)	実際運転時間 (分-秒)	電力消費量 (kWh/ユニット)		実際運転時間 (分-秒)	電力消費量 (kWh/ユニット)		実際運転時間 (分-秒)	電力消費量 (kWh/ユニット)	実際運転時間 (分-秒)	電力消費量 (kWh/ユニット)		
			一次側	二次側		一 次 側	二 次 側				一 次 側	二 次 側	
大 宮	19-30	18-24	253.8	231.0	18-15	264.6(+ 4.3)*	241.1(+ 4.4)*	19-21	219.3(-13.6)*	193.9(-16.1)*			
小 山	13-00	12-26	189.6	174.4	12-21	193.8(+ 2.2)	178.1(+ 2.1)	12-45	160.2(-15.5)	145.2(-16.7)			
宇 都 宮	17-00	17-00	290.4	270.0	16-49	300.6(+ 3.5)	280.4(+ 3.8)	17-07	271.2(- 6.6)	248.9(- 7.8)			
那須塩原	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
新 白 河	14-45	14-49	119.4	102.2	14-54	133.2(+11.6)	115.6(+13.1)	14-33	128.1(+ 7.3)	110.0(+ 7.6)			
郡 山	16-30	16-26	172.5	152.8	16-32	171.6(- 0.5)	151.3(- 1.0)	16-45	157.5(- 8.7)	135.9(-11.1)			
福 島	13-45	13-30	207.0	191.4	13-40	190.2(- 8.1)	172.6(- 9.8)	14-03	162.6(-21.4)	144.7(-24.4)			
白石蔵王	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
仙 台	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
古 川	16-30	15-59	278.4	259.6	16-48	251.4(- 9.7)	230.9(-11.0)	16-28	229.2(-17.7)	208.4(-19.7)			
一ノ関	11-15	11-02	193.8	180.3	10-53	200.4(+ 3.4)	185.4(+ 2.8)	11-09	182.7(- 5.7)	168.5(- 6.5)			
水沢江刺	9-00	8-35	130.8	120.5	8-55	108.0(-17.4)	96.6(-19.8)	9-01	98.7(-24.5)	88.4(-26.6)			
北 上	8-30	8-17	120.0	109.7	8-18	115.8(- 3.5)	106.0(- 3.4)	8-20	105.3(-12.2)	94.6(-13.8)			
新 花 巻	14-15	13-05	208.8	192.6	14-01	187.8(-10.1)	170.3(-11.6)	14-07	167.4(-19.8)	147.8(-23.3)			
合 計	154-00	149-33	2,164.5	1,984.5	151-26	2,117.4(- 2.2)	1,928.3(- 2.8)	153-39	1,882.2(-13.0)	1,686.3(-15.0)			

* () 付きの数字は方式 I の電力消費量に対する各方式の電力消費量の増減率を百分率で表したものの (+: 増, -: 減)。

図 11 簡略計算法による計算結果と実測結果との対比

Fig. 11. Comparison between calculated and measured results.

石蔵王間で装置の制御プログラムの部分的なバグによってかなりの延着となったが、これらの区間のデータを含めても、ほぼ全区間 ± 15 秒の範囲に入っていて定時運転精度が最も良くなっている。ただし、方式Ⅲについても、全般的に若干早着運転となっている。これは、運転時間の予測計算に用いた走行抵抗を若干大きく想定したこと、ATC ブレーキの緩解速度を ATC 信号速度より 5 km/h 低い速度と想定したこと (実際は 1~3 km/h であった) などによるものである。ちなみに、実測結果を基に簡略計算法によって、最初に ATC ブレーキが作動するまでの運転時間、速度の計算を行った結果と実測値とを対比して図 11 に示す。予測結果と実測値との差は 1 秒程度と小さく、簡略計

算法が実用上十分な計算精度を有していることがこの結果からも言える。

(2) 電力消費量 表 2 に各方式の電力消費量のほかに、各駅間ごとに現状運転の方式Ⅰに対する方式Ⅱ、Ⅲの一次側および二次側電力消費量の増減率を百分率で示してある (括弧付きの数字)。実測結果そのままと比較すると、方式Ⅰに対して方式Ⅱ、Ⅲで一次側電力消費量で 2.2%, 13.0%, 二次側電力量の比較で 2.8%, 15.0% それぞれ少なくなっている。なお、この実測結果には運転方式による差のほかに運転時間の影響が入っている。そこで、各運転方式とも計画運転時間どおりの時間で運転された場合の電力消費量を、実測結果を基に推定してみる。電力消費量の補正

図 12 運転制御状態の例

Fig. 12. Example of train operation control.

方法は次のとおりである。計画運転時間と実際運転時間との差が計画運転時間に対して $n(\%)$ あり、 n があまり大きくないものとする。この場合 $n(\%)$ の運転時間の補正は、ほぼ $n(\%)$ の最高運転速度の変化になる。 $n(\%)$ の速度変化によって、走行抵抗が速度の二次関数で与えられることから、ほぼ $2n(\%)$ 運転エネルギーが変化することになる。そこで、二次側電力消費量を $2n(\%)$ 補正し、空調機器や主回路機器冷却用回転機類での単位時間あたりの電力消費量は一定であると仮定して $n(\%)$ 補正する。このような補正を 11 駅間全体の電力量に対して施して、再び現状運転に対する方式Ⅱ、Ⅲの電力量の比較を行うと、方式Ⅱは現状運転より一次側で 0.04% 逆に増え、二次側では 0.4% の減となっている。一方、方式Ⅲは一次側で 8.7%、二次側で 10.2% 少なく、さらに提案した省エネルギー運転方式によって、顕著な省エネルギー効果が得られている。ただし、これは営業運転ダイヤとは少し異なる試運転ダイヤによる限られた期間における試験結果であって、個人差の大きい乗務員の運転の実態をあまねく反映したものではないことを付記しておきたい。また、文献(1)において、直流主回路入力エネルギーの比較で方式Ⅲのほうが方式Ⅱより 10% 程度少なくなことを示したが、補正した二次側電力消費量で方式ⅡとⅢの比較を行うと、方式Ⅲが 9.8% 少なくなっており、このことを裏付けている。なお、図 12 に方式Ⅲの運転制御状態の一例を示してある。この図で、破線は方式Ⅰの速度データを併記したものである。

6. 結 論

以上、本論文で述べたことを要約すると、次のとおりである。

(1) 営業運転における車両性能の変動の影響を十分吸収することが可能な、実時間制御による現実的な省エネルギー運転制御方式を提案した。

(2) 上記制御を実現するうえで必要な運転時間の予測計算に関して、簡略計算法を提案した。本計算法は、計算誤差 1 秒程度、演算プロセッサを用いた場合の計算時間はたかだか 0.5 秒と実用上十分であることを示した。

(3) 運転時間の簡略計算法を用いた運転制御システムを開発し、本線走行試験を実施した。その結果、試運転ダイヤによる限られた期間における乗務員の運転との対比ではあるが、提案した運転制御方式によって顕著な省エネルギー効果が得られた。また、さきの論文で示した方式 A(本論文の方式Ⅱ)と方式 D(方式Ⅲ)で、10% 程度後者のほうが運転エネルギーが少なくなることが裏付けられた。

なお、運転制御システムの開発に際して三菱電機(株)伊丹製作所の方々に、また本線走行試験の実施に関して国鉄本社運転局、車両局、首都圏本部、仙台鉄道管理局、盛岡鉄道管理局、仙台工場、そして鉄道技術研究所車両制御研究室の関係各位の多大なる協力をいただいた。ここに記して心からお礼申し上げる次第である。

(昭和 61 年 10 月 3 日受付)

文 献

- (1) 保川：「運転エネルギーの一計算法とそれを用いた新幹線各駅停車列車省エネルギー運転法の検討」，電学論 B，105，769 (昭 61-9)
- (2) 金田・保川：昭 61 電気学会全大，No. 880
- (3) 稲田・古賀：「運転曲線計算システムの開発」，鉄道技術報，No. 932 (昭 49-10)