新幹線通過列車の省エネルギー運転法に関する一検討

正 員 保 川 忍 (鉄道技研)

1. ま え が き

著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⁾⁽²⁾。次に、この運転方法を実現するための実用的な運転制御方式を提案し⁽³⁾、マイクロコンピュータを用いた乗務員の運転を支援するシステムとして本制御方式を組み込み、東北新幹線において走行試験を実施した。限られた期間の試験走行ではあったが、乗務員の現状の運転に比べて、提案した省エネルギー運転方式による運転のほうが大略 10% 省エネルギーとなるという結果が得られた⁽⁴⁾。

しかし、新幹線のもう一方の列車種別である通過列車については、省エネルギー運転法の検討がなされていない。本論文では、現実の列車運転の容易さなどを考慮に入れつつ、この通過列車の省エネルギー運転法の検討を行い、運転方法を明らかにしている。

通過列車の場合、各駅停車列車の追越しなどの列車群制御の面から、各通過駅における通過時刻を列車ダイヤで定め、これに基づいて運転管理システム⁽⁵⁾による運行管理が行われている。そこで、まず現在の列車運転計画によって定められている各通過駅の通過時刻を遵守する場合について、運転法を検討している。最初に、通過駅数が1駅の場合について、四つの運転方式の運転エネルギーを比較し、また運転エネルギーの最高速度に対する変化率を算出することによって、省エネルギーとなる運転方法を明らかにしている。そして、その結果を踏まえて通過駅が n 駅の場合も通過駅が1駅の場合と同一の運転方法となることを示している。次いで、現行の各駅間運転時間の配分方法からはずれて、通過駅が1駅の場合について各駅間運転時

間の配分を種々に変えて、運転エネルギーの比較を行い、通過駅における通過時刻に拘束されない場合は、結局、発駅から着駅まで全体を一つの駅間とみなして各駅停車列車で提案した方式と同じ運転、すなわち最大力行による加速、その駅間の運転エネルギーを最小とする速度での定速運転の後、ある地点からだ行とATCブレーキによる減速を繰返して次駅へ到着する運転方法を用いるのが、最も省エネルギーとなることを明らかにしている。

2. 現状運転ダイヤの通過駅通過時刻を遵守する場合の省エネルギー運転法の検討

〈2・1〉 通過駅が1駅の場合

(1) 現状の通過駅通過時刻の設定方法 現在の新幹線の列車運転計画では、図1(a)に示すような加速、定速運転、ATCブレーキの運転モードを組合せた走行パターンを想定しており、だ行による減速を用いていない。本章では、この走行パターンを前提として定められた現行の列車運転計画における駅間運転時間配分の場合の省エネルギー運転法について検討する。

(2) 想定する運転モード 省エネルギー運転のために用いるべき運転モードについては、走行抵抗を線形化して力学エネルギー最小化のための最大原理によるアプローチから、最大力行、定速運転、だ行、最大ブレーキ(新幹線の場合、ATCブレーキがこれに対応)を用いるべきであることが⁽⁶⁾⁽⁷⁾、またダイナミックプログラミングによる定式化からは、主電動機の効率を一定と仮定すると、定速運転を除く上記三つの運転モードを用いるべきであることが⁽⁸⁾指摘されている。本論文では、最大力行、定速運転、だ行、ATCブレーキ、停止ブレーキの運転モードを想定する。定速運転については、本論文で想定している図2(e)の方式1のほかに、同図中の方式2のように完全な等速走行とはならないが、定速走行速度 v_s を中心に Δv

A Study on Energy Saving Train Operation Methods for the Shinkansen Express Train Service. By Shinobu Yasukawa, Member (Railway Technical Research Institute), 保川 忍: 正員, 鉄道総合技術研究所

図 1 エネルギー比較をする四つの運転方式

Fig. 1. Four train operation methods for energy comparison.

の速度幅で最大力行とだ行の繰返しによる方式も考えられ、 v_p や Δv の値によっては後者のほうが車両の直流主回路への入力エネルギーが少なくなる場合がある。しかし、この場合でも方式 1 とのエネルギー差はきん少であり、省エネルギー運転法の検討に与える影響がほとんどないことと、方式 2 では乗心地を著しく害することになるため、方式 1 による定速運転を想定している。また、最大ブレーキ力よりは弱いブレーキ力による停止ブレーキのモードも、乗心地の観点から用いべき運転モードとして加えている。そして、これらの運転モードを用いる場合であっても、例えば図 2 (a)～(d) のように列車の加速や減速を行う方法としては、最大力行と定速運転の併用による加速 ((a) 図)、最大力行とだ行の繰返しによる加速 ((b) 図)、だ行と定速運転による減速 ((c) 図)、だ行と最大力行を用いた減速 ((d) 図) など複数の運転モードの併用による方法が考えられるが、運転エネルギー低減の観点からは不利な運転方法であるので、単一の運転モードによるものとする。

(3) 比較する運転方式 エネルギー比較を行う運転方式としては、図 1 に示す四つの方式を考える。方式 A は先述のように、現在行われている各駅間運転時間の設定で想定されている走行パターンであり、実際の運転もこれに準拠したものが多。方式 B は、方式 A を特殊なケースとして包含した運転方式で、それぞれの駅間の運転速度 v_{01}, v_{02} を定められた

図 2 幾つかの運転モードを組み合わせた運転モード

Fig. 2. Train acceleration and deceleration methods combining basic train operation modes.

駅間運転時間が満足される範囲で変化させることによって運転エネルギーが変化する。方式 C は、方式 A より最初の駅間の運転速度を更に低下させた場合の運転エネルギーを調べるために設定した運転方式の一つであって、通過駅を最大力行による加速によって通過する。列車の運転方法としては、このほかにも無数に考えられるが、方式 D はそれらを代表させた運転方式の例で、最初の駅間の運転速度を二段階に切替えた場合である。

なお図 1 において、 S_{01}, S_{02} はそれぞれ運転速度 v_{01}, v_{02} での定速運転距離 (方式 B)、 v_1 : 通過駅通過速度、 $v_1, \dots, v_{km}$: ATC ブレーキが作動する速度、 v_{km+1} : 停止ブレーキを作用させる速度、 S_{01}^a, S_{01}^b : 速度 v_{01}, v_1 での定速運転距離 (方式 D) を表している。

(4) 運転エネルギーの計算 上記で仮定した各運転方式の運転エネルギーの計算は、これらの方式における各駅間の運転時間を満足する v_0 を求め、文献 (2) に記載の方法によって行う。 v_0 の計算は、(1) 式で与えられる運動方程式において $\varphi(v)$ を速度の二次関数で表現して求めた運転時間、距離の計算式 (速度の関数) と、運転時間 t の v_0 に対する微係数 dt/dv_0 とから Newton-Raphson 法によって行う。なお、 dt/dv_0 は図 3 のケースについて、定速運転速度 v_0 を Δv_0 だけ増加させたときの運転時間の増分を求めることによって、それぞれ以下のように与えられる。

$$dv/dt = \varphi(v) \dots\dots\dots (1)$$

図 3 (a), (b) の場合

$$dt/dv_0 = -S_0/v_0^2 \dots\dots\dots (2)$$

図 3 V_0 を求める事例

Fig. 3. Cases of calculating V_0 .

図 3 (c) の場合

$$dt/dv_0 = -S_0/v_0^2 + (v_0/v_{ATC} - 1) \times 1/\varphi_b(v_0) \quad (3)$$

図 3 (d) の場合

$$dt/dv_0 = 1/\varphi_a(v_0) - S_0/v_0^2 \quad (4)$$

ここに、 $\varphi_b(v_0)$, $\varphi_a(v_0)$ は速度 v_0 における ATC ブレーキ、最大力行の各運転モードに対する (1) 式の $\varphi(v)$ を意味している。また、図 3 (c) の v_{ATC} は、ATC 信号速度が速度 v_0 より低い値に変化したときに作動した ATC ブレーキが緩む速度 (通常は ATC 信号速度より 3 km/h 程度低い速度) であり、ブレーキが緩んだ後、この速度で定速運転を行うものと仮定している。

(5) 運転エネルギーの比較 図 4 に東北新幹線大宮-宇都宮間の方式 B の直流主回路入力エネルギーの計算例を示す (以下、すべて運転エネルギーは直流主回路への入力エネルギーを表す)。なお、図中に運転エネルギーの最小値を示し、また方式 A の運転エネルギーを併記してある。最初の駅間、大宮-小山間の運転速度 v_{01} をパラメータにして、小山-宇都宮間の運転速度 v_{02} を変えて計算したものである。この結果は、所定の運転時間を満足する範囲で v_{01} を極力低くしたほうが運転エネルギーが少なくなること、すな

図 4 方式 B の運転エネルギーの計算例

Fig. 4. Example of calculated energy in the train operation method B.

図 5 方式 B で運転エネルギーが最小となる運転パターン

Fig. 5. Train operation pattern with minimum energy consumption in the method B.

わち、図 5 に示すような最初の駅間はだ行による減速をなくした運転とすべきことを示唆している。そこで、 v_{02} をパラメータとし、 v_{01} を変化させたときの運転エネルギーの変化率 $\partial E_{dc}/\partial v_{01}$ を次に求めてみる。これは以下の式で求めることができる。

$$\begin{aligned} \partial E_{dc}/\partial v_{01} = & f_{ae}'(v_{01})S_{01} + \{G_{ae}(v_{01}) \\ & - f_{ae}(v_{01})\} \cdot v_{01}/\varphi_a(v_{01}) \\ & + f_{ae}(v_{01})\{v_s/\varphi_c(v_s) \cdot dm_1/dn_1 \\ & + v_{01}/\varphi_c(v_{01})\} + \{G_{ae}(v_s) \\ & - f_{ae}(v_{01})\} \cdot v_s/\varphi_a(v_s) \\ & - f_{ae}(v_{02}) \cdot v_{01}/\varphi_c(v_{01}) \cdot dm_2/dn_2 \\ & \times dm_1/dn_1 \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

$$dm_1 = -S_{01}/v_{01}^2 \dots \dots \dots (6)$$

$$dn_1 = (1 - v_s/v_{01})/\varphi_c(v_s) \dots \dots \dots (7)$$

$$dm_2 = (v_{02} - v_s) \cdot \varphi_c(v_1)/\{v_1 \varphi_a(v_s)\} \dots (8)$$

$$\begin{aligned} dn_2 = & 1 + v_0 \sum_{l=1}^{k_m} \{1/\varphi_b(v_l) - 1/\varphi_c(v_l)\} \\ & \times \prod_{k=1}^l \{\varphi_c(v_k)\} / \prod_{k=1}^{l-1} \{\varphi_b(v_k)\} \\ & - (v_{02}/v_{k_{m+1}}) \prod_{k=1}^{k_m} \{\varphi_c(v_k)/\varphi_b(v_k)\} \\ & \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

ここに、 $G_{ax}(v)$, $f_{ax}(v)$ は文献(2)に示したように、車両の主回路効率(駆動系の伝達効率を含む)を考慮に入れた見掛けの駆動力、走行抵抗を表している。また $\varphi_a(v)$, $\varphi_b(v)$ は先述のとおりであり、 $\varphi_c(v)$ はだ行モードのそれを表している。また、その他の記号は、さきに図1に関して説明したとおりである。

図6に図4に対応した $\partial E_{dc}/\partial v_{01}$ の計算例を v_{02} をパラメータにとって示してある。同図より、 v_{02} がいかなる値であっても、常に $\partial E_{dc}/\partial v_{01} > 0$ であることがわかる。これは、最初の駅間の運転速度 v_{01} を増大させると運転エネルギーが増加する、換言すれば極力

図6 方式Bの $\partial E_{dc}/\partial V_{01}$ の計算例
Fig. 6. Example of calculated $\partial E_{dc}/\partial V_{01}$ of the method B.

v_{01} を低くすべきことを意味している。また $\partial E_{dc}/\partial v_{01}$ は二つの駅間距離の相対的な長さによっても変わるの
で、運転時間 1,800 秒の方式 A に相当する運転速度は変えないようにして、中間駅の小山の位置を実際の駅間距離比率 6.3 : 3.7 から最大 1.8 : 8.2 まで最初の駅間距離を短くして、 $\partial E_{dc}/\partial v_{01}$ の変化を調べてみた。図7にこの場合の $v_{02}=206$ km/h 付近における $\partial E_{dc}/\partial v_{01}$ の変化状況を示す。図中のそれぞれの $\partial E_{dc}/\partial v_{01}$ 曲線にパラメータとして最初の駅間距離と v_{02} を示してある。同図から、最初の駅間距離が極端に短くなると $\partial E_{dc}/\partial v_{01} < 0$ となる場合が生ずる。この微係数が負となる場合が生ずる駅間距離の場合について、運転エネルギーの v_{01} に対する変化を v_{02} をパラメータにとって示すと、図8のようになる。同図で*印と**印を付したものは、その点で $\partial E_{dc}/\partial v_{01}=0$ 、すなわち運転エネルギーが v_{01} の変化に対して最小となることを示している。これらの印のないものは、常に $\partial E_{dc}/\partial v_{01} > 0$ であることを意味している。例えば、最

図7 $\partial E_{dc}/\partial V_{01}$ の計算例 (方式 B: 駅間距離の配分を変えた場合)

Fig. 7. Example of calculated $\partial E_{dc}/\partial V_{01}$ of the method B in case of varying the rate of the distance of each section.

図 8 図 7 に対応した運転エネルギー
Fig. 8. Calculated energy consumption
corresponding to the results of Fig. 7.

初の区間の駅間距離 13,968 m の場合、 $v_{02}=185.3$ km/h 付近で運転エネルギーが最小となるが、このときは常に $\partial E_{dc}/\partial v_{01} > 0$ となっている。他の駅間距離の場合も同様である。このことから、運転エネルギーが最小となる点の近傍では常に $\partial E_{dc}/\partial v_{01} > 0$ となっていることがわかる。

以上のことから、結局、方式 B における運転エネルギーが少なくなる列車の運転方法は、図 5 に示したように最初の駅間はだ行による減速のない運転とし、次の駅間は各駅停車列車の場合同様、次式を満足する v_{02}^* をこの駅間の運転速度とし、最大力行による加速、 v_{02}^* での定速運転の後、ある地点からだ行と ATC ブレーキによる減速を繰返し、最後停止ブレーキによって次駅へ到着する運転方法であると言える。

$$\begin{aligned} \partial E_{dc2}/\partial v_{02} \big|_{v_{02}=v_{02}^*} &= \{G_{ae}(v_{02}^*) - f_{ae}(v_{02}^*)\} \\ &\quad \times v_{02}^*/\varphi_a(v_{02}^*) + f_{ae}'(v_{02}^*)S_{02} \\ &\quad - f_{ae}(v_{02}^*)dm/dn \\ &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 E_{dc2} : 後の駅間の運転エネルギーであり、 dm/dn は (11) 式に示すように、駅間運転時間が同じとい

図 9 方式 C の運転エネルギーの計算例
Fig. 9. Example of calculated energy in the
train operation method C.

う条件下で運転速度 v_{02} を変化させたときの速度 v_{02} での定速運転距離 S_{02} の変化率を表しており、 dm 、 dn はそれぞれ文献 (2) の (55)、(56) 式で与えられる。

$$dS_{02}/dv_{02} = dm/dn \quad (11)$$

次に、図 9 に方式 C の運転エネルギーの計算例を示す。この方式は、方式 B で最初の駅間の運転速度を図 5 に示すように、だ行による減速がない運転となる速度にとった場合が運転エネルギーが少なくなることから、 v_{01} を更に低くとった場合について吟味するために仮定した運転方式である。図 9 に示す結果より、 v_{02} が低い領域では v_{01} が低くなるにつれて運転エネルギーが少なくなることがわかる。しかし v_{02} を高くしていき v_{02}^* 付近の値にすると、ほとんど運転エネルギーが変化しなくなり、図 5 の運転方法の運転エネルギーにほぼ同じとなる。運転時間を短くした場合 (図 9 (b))、方式 B の運転エネルギーの最小値よりも若干少なくなるが、その差は高々 0.2% 程度と非常に少なく、やはり図 5 に示す運転方式とほぼ変わ

らない。

方式Cより更に v_{01} が低くなる方式Dの運転エネルギーの v_{01} に対する変化率は、次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} dE_{dc}/dv_{01} &= \{f_{de}'(v_{01}) - \{f_{de}(v_s) - f_{de}(v_{01})\} \\ &\quad \times (v_s/v_{01}) / (v_s - v_{01})\} S_{01}^a \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

図10に示すように、直線Aで表される傾きは上式の大括弧の中の第1項 $f_{de}'(v_{01})$ を、また直線Bは図中に記した $x_1 = \{f_{de}(v_s) - f_{de}(v_{01})\} / (v_s - v_{01})$ に対応した傾きを表している。ところで、実際の車両の走行抵抗と同じように $f_{de}(v)$ を速度についてほぼ凸関数とみなせるが、この場合凸関数の性質から、図示のように常に $x_1 > f_{de}'(v_{01})$ となる。また $v_s > v_{01}$ であるので $x_1 \times (v_s/v_{01})$ 、すなわち(12)式における大括弧の中の第2項は常に第1項の $f_{de}'(v_{01})$ より大きくなる。従って、大括弧の中は常に負となることから、常に $dE_{dc}/dv_{01} < 0$ となることがわかる。このことは、 v_{01} を高くとったほうが運転エネルギーが少なくなることを意味しており、方式Dにおいて $S_{01}^a = 0$ とした極限状態を表している方式Cのほうが、常に運転エネルギーが小さくなることを示している。なお、方式Dでは v_{01} 、 v_s の二段階の運転速度の場合を想定したが、もっと多くの速度を組合せた運転方法の場合も、方式Dの図1(d)に一点鎖線で囲んだ部分の組合せとみなすことができ、方式Dを含めてこのような運転方法は、省エネルギーの面から得策ではないことが言える。

以上に述べたことにより、実質的には図5に示したように、最初の駅間はだ行による減速のない運転とし、次の駅間は最大力行による加速、その駅間の運転エネルギーを最小とする速度での定速運転の後、ある地点からだ行とATCブレーキによる減速を繰返して次駅へ到着する運転方法を用いるのが省エネルギーと

図10 $dE_{dc}/dv_{01} < 0$ となることの説明図
Fig. 10. Figure for explaining $dE_{dc}/dv_{01} < 0$.

図11 通過駅数が2の場合の運転エネルギーの計算例

Fig. 11. Example of calculated energy in case of two intermediate stations where the train passes without stopping.

なることが示された（以下にこの方式を方式B*と称する）。

〈2.2〉 通過駅が2駅以上の場合 前節の検討結果より、通過駅数 n が2以上の場合についても、最後の駅間以外はだ行減速のない図5の最初の駅間と同様の運転とし、最後の駅間のみ $n=1$ の場合、同様の運転とすればよいことが推察される。そこで、一例として $n=2$ の宇都宮-郡山間について図11(a)に示すように、最後の駅間の運転速度 v_{02} およびその一つ手前の駅間の運転速度 v_{01} を変化させて、運転エネルギーを求めた結果〔同図(b)〕もこのことを裏付けている。

以上の検討結果から、現状の列車運転計画で定められた時刻に各通過駅を通過する場合については、方式B*の運転とすべきことが明らかになった。

3. 通過駅の通過時刻を現状の列車運転計画に拘束されことなく自由に設定した場合の運転法

〈3.1〉 運転時間の配分による運転エネルギーの変化 次に、発駅から着駅までの運転時間だけを現行の列車運転計画で定められた時間とし、途中の通過駅における通過時刻を、現在の運転計画にとらわれることなく自由に設定した場合の運転エネルギーを、以下において調べる。

図12は、大宮-宇都宮間の運転時間1,800秒、1,720秒の場合について、大宮-小山間と小山-宇都宮間の運転時間を種々に変化させ、それぞれについて

図 12 運転時間の配分を変えた場合の
運転エネルギーの計算例

Fig. 12. Example of calculated energy in
the train operation B*.

図 13 運転方式 E

Fig. 13. Train operation method E.

方式 B* によった場合の運転エネルギーの変化状況を
示したものである。図中の a は、現在の列車運転計画
に従って定めた運転時間の配分で、かつその配分法で
想定している走行パターン、すなわち方式 A の場合
の運転エネルギーを、また b は二つの駅間の運転時間
の配分が図 13 に示すように、発駅から着駅まで全体
を一つの駅間とみなして、各駅停車列車の省エネ
ギー運転方式と同じ運転となるように行った場合（以
下、方式 E と呼ぶ）のエネルギーを表している。この
計算結果から、通過時刻の拘束をはずした場合、各駅
停車列車の省エネルギー運転法と同じ運転を行うのが
運転エネルギーが少なくなることがわかる。方式 B*
の場合、方式 A に比べ、例えば $t=1,800$ 秒では 7.3
% の運転エネルギーの低減であるのに対して、9.0%
と更に 1.7% 少なくなっており、省エネルギー面から
の有用性が認められる。

そこで、東北新幹線下りについて（昭和 61 年 11 月
改正以降の運転ダイヤ）、通過運転となる区間におけ

図 14 方式 E を用いる場合に留意すべき事例

Fig. 14. Cases to be cared from a viewpoint of
controlling a group of trains in case of using the
train operation method E.

表 1 方式 A に対する省エネルギー率の比較

Table 1. Comparison of the rate of saved
energy to the energy consumed in the train
operation method A.

駅 間	通過 駅数	運 転 時 間 (s)	運転エネルギー (J×10 ¹⁰)			方式 A に対 する省エネ ギー率 (%)	
			方式 A	方式 B*	方式 E	方式 B*	方式 E
大宮～宇都宮	1	1,530	0.6647	0.6260	0.6096	5.8	8.3
福島～仙台	1	1,500	0.5610	0.5196	0.5123	7.3	8.7
郡山～仙台	1	1,305	0.5012	0.4550	0.4504	9.2	10.1
宇都宮 ～新白河	1	1,350	0.6348	0.6066	0.5756	4.4	9.3
上野(大宮) ～宇都宮	1	1,440	0.6554	0.6176	0.5971	5.8	8.9
宇都宮～郡山	2	1,965	0.8902	0.8453	0.8310	5.0	6.7
郡山～仙台	2	2,220	0.8585	0.8193	0.8068	4.6	6.0
大宮～福島	5	3,990	1.7848	0.1738	1.7293	2.6	3.4
仙台～盛岡	5	3,060	1.4215	0.1386	1.3627	2.5	4.1
						5.0*	6.7

*：東北新幹線下り定期列車全体の方式 A に対する省エネルギー率

る運転方式 A, B*, E の運転エネルギーの比較を行っ
た。結果を表 1 に示すが、同表から方式 A に比べて
対象としている区間の下り定期列車全体で、方式 B*
が 5.0% の節減であるのに対して、方式 E は 6.7%
となり、B* より有利であることがわかる。

〈3・2〉 方式 E を用いる場合の留意すべき点 前
節の検討結果から、方式 E が最も有効であることが明
らかになったが、現行の走行パターンである方式 A に
比べて運転速度が高くなるので、各通過駅を早通運転*

*：運転ダイヤで定められた時刻よりも早く通過駅を通過すること
になる運転の意味である。以下の記述における早通時間は、こ
の場合の運転ダイヤ上の通過時刻より通過駅の通過が早まる時
間を表している。

表2 方式Eの運転速度と $\Delta t_{\max}$ Table 2. Optimum running speeds of the method E and $\Delta t_{\max}$.

駅 間	運転時間 (s)	最高運転速度 (km/h)		$\Delta t_{\max}$ (s)
		方式A	方式E	
大宮～宇都宮	1,530	209.5	221.7	49.1
福島～仙台	1,500	200.2	217.7	62.5
那須塩原～郡山	1,305	196.8	212.9	52.3
宇都宮～新白河	1,350	216.8	232.8	46.5
上野(大宮)～宇都宮	1,440	216.1	228.1	43.7
宇都宮～郡山	1,965	213.5	221.5	48.4
郡山～仙台	2,220	202.8	213.4	74.1
大宮～福島	3,990	213.8	217.3	54.7
仙台～盛岡	3,060	217.2	222.6	57.6

することになる。そして、図13の地点aでそれが最大となり、その後停車駅へ到着するまでの間に時間調整がなされることになる。そのため、図14(a)に示すように、各駅停車列車をk駅で追越す場合、通過列車のk-1駅発車時刻を、方式Aの場合に比べて Δt_0 だけ遅らせることが必要となる。早通時間の最大は $\Delta t_{\max}(>\Delta t_0)$ となるが、 $\Delta t_{\max}$ が大きい場合、追越した通過列車と追越された各駅停車列車との間隔が、方式Aの場合と比較して詰まることになる。この間隔が十分とれない場合には、k駅での各駅停車列車の発車をその分だけ遅らせることが必要となる可能性がある。また、(b)図に示すように、各駅停車列車の後からk+1駅に到着し先発する場合、 t_1 だけ余分に各駅停車列車が発車を待たされることになる。 t_1 は、各駅停車列車とその後を走行する通過列車との間隔が詰まるために、通過列車が減速しなければならないことがない時間(方式Aと比較して)であり、その最大は $\Delta t_{\max}$ となる。

そこで、表1の各駅間に対して方式AとEの運転速度、方式EのAに対する早通時間の最大値 $\Delta t_{\max}$ を計算した。表2にその結果を示すが、同表から早通時間の最大値は、高々1分程度にすぎないことがわかる。これは、方式AとEの運転速度の差が駅間距離によって変化するためである。

上記程度の早通時間であれば、臨時列車を含めた最も運転密度の高い場合でも1時間に5本の列車の運転である東北新幹線のような線区では、さきに指摘した点は特に問題となることはない。従って、このような線区については、運転ダイヤの設定は方式Eを前提として各駅間の運転時間の配分を行うようにし、列車群制御の面でも、極力省エネルギーを考慮すべきである。

4. 結 論

新幹線の通過列車の省エネルギー運転法について検討し、下記の結果を得た。

(1) 次駅が通過駅となる駅間については、最大力行の後定速走行によって通過するか(最初の駅間)、定速走行の維持による運転(中間の駅間)とし、だ行減速の入らない運転とすべきである。

(2) また、最初の駅間については、上記のように最大力行の後定速運転のみによって、次駅を通過すべきであり、方式Dのように定速運転の途中から更に加速と定速運転を組合せて走行する運転は用いるべきではない。これは、走行抵抗が速度に対する凸関数となることから示すことができる。

(3) 次駅が停車駅となる駅間については、最大力行によって、その駅間の運転エネルギーが最小となる速度まで加速し、その速度での定速走行の後、だ行とATCブレーキにより減速を行う各駅停車列車の省エネルギー運転法と同じ運転とすべきである。

(4) 加速、定速走行、ATCブレーキと定速走行の繰返しによる減速という走行パターンを前提とした現在の運転ダイヤに関する上記運転法を用いた場合よりも、途中の通過駅における通過時刻の拘束をはずして全体を一つの駅間とみなして、各駅停車列車の省エネルギー運転法と同一の運転とするほうが、エネルギー的には有利である。例えば、東北新幹線(下り)の通過運転区間全体で、前者より1.7%更に省エネルギーとなる。

(5) 各駅停車列車の省エネルギー運転法と同じ運転とする場合、現行運転ダイヤより早通となるが、列車群制御面で特に問題となるほどではない。

(昭和62年11月24日受付、同63年3月24日再受付)

文 献

- (1) 保川, 他: 昭60電気学会全大, No. 766
- (2) 保川: 「運転エネルギーの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, 106, 33 (昭 61-9)
- (3) 金田・保川: 昭61電気学会全大, No. 880
- (4) 保川・藤田: 「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」, 電学論D, 107, 665 (昭 62-5)
- (5) 山本, 他: 「コムトラックシステムの研究(第1報)」, 鉄道技術研報, No. 847 (昭 48-7)
- (6) 市川: 「列車運転の最適化」, 機械学論(第1部), 34, 308 (昭 43-2)
- (7) H. Strobel, et al.: "A Contribution to optimum computer-aided control of train operation", Proc. of the 2nd IFAC/IFIP/IFORS Symp., p. 377 (1974)
- (8) N. Inada: "An approach to optimization problem in train operation", Proc. of IFAC Tokyo Symp., p. 307 (1965)