複々線同等の高速・高密度運行を可能にする駅間3線運行方式

学生員 勝 田 敬 一 (東京大学)

正 員 古 関 隆 章 (東京大学)

正 員 曾 根 悟 (工学院大学)

Train Service on a Triple-Track Line as Rapid and Frequent as on a Quadruple-Track Line

Keiichi Katsuta, Student Member, Takafumi Koseki, Member (The University of Tokyo),
Satoru Sone, Member (Kogakuin University)

The train service in Japan loses rapidity, comfort and robustness against delays in morning peak hours especially, and it has been a serious social problem. On the other hand, the cost to purchase land for a new track is very high. An efficient train operation is proposed in this paper. The proposed train operation has substantially high rapidity and train density identical to a quadruple-track line, with a novel train scheduling based on full usage of a triple-track line. The significance of the proposed train operation on a triple-track line has been verified based on the calculations of waiting time and boarding time of passengers. Consequently train operators can keep the rapidity, moreover, raise track capacity by operating express and local trains like knitting on triple-track lines.

キーワード：3線運行方式, 複々線運行方式, 交互着発, 運行計画, 高密度運行

Keywords: Triple-Track, Quadruple-Track, Alternative Stop and Go, Scheduling, Frequent Train Operation

1. 背 景

鉄道は、環境負荷が小さく、安全で、快適に都市生活を営むための基幹的かつ必要不可欠な交通機関である。しかし、現在、「速達性向上」「混雑緩和」といった早急な対応を求められている課題は多い。特に、旅客需要が減少傾向にある今日においても、速達性や快適性が、朝に都心方面へ向かう通勤・通学客に対して、十分に提供されていないことは、わが国が抱える大きな社会問題のひとつである。

この問題に対し、路線の新設・複々線化などが計画されているが、導入空間確保の問題や既存のネットワーク上での工事の複雑化によって、鉄道整備費用が増大する一方で、今後の鉄道需要に大幅な増加が期待できないことから、大規模投資を行うことが困難な状況である。また、保安システムの改良による時隔短縮など、比較的小規模な投資による列車運行密度の向上が図られてはいるが、この問題を大きく改善するまでには至っていない。したがって、このような状況下では、輸送需要や社会的ニーズに的確に対応した効率的かつ重点的な鉄道整備がこれまで以上に重要となる。

そこで、本論文では、都市近郊型路線において現在の技術レベルを前提とし、駅間3線設備の効率的な利用によって、複々線同等の速達性と快適性の実現を可能にする新しい運行方式を提案する。

2. 複線運行方式の問題点

(2・1) 両立不可能な高密度運行と速達性 優等列車の運行を基本としている複線路線では、待避設備をいくつかの駅に用意しているが、図1(a), (b)に示すように、普通列車の追い抜かれ時間 $T_{passedloss}$ [†]が発生⁽¹⁾すること、列車密度にある限界が生じ、それを越えると、図1(b)のように、優等列車を低速運転しなければならないこと、という2つの問題点がある。

このため、現在、多くの都市近郊型路線が、通勤・通学時に、列車密度を上げるため、優等列車を低速運転し、速達性を犠牲にしている。

図1 複線方式の問題点

Fig. 1. Problems of operations on a double-track line

[†] 優等列車に追い抜かれるために余分に停車する時間

〈2・2〉 従来の解決方法

〈2・2・1〉 交互着発運行方式 複線における待避設備を持たない駅では、図 2(a) のように、後続列車は先行列車の駅停車損失時間 $T_{stoploss}$ 、すなわち、駅停車に必要な減速・停車・加速で損失する時間に安全余裕時間 $T_{between}$ 、すなわち、保安に必要な時間に定時運行するための余裕を加えた時間を加えた時隔をあけて運行しなければならない。

また、待避設備を持つ駅でも、図 2(b) のように、追い抜きを行うことで、列車密度にある限界を生じさせるとともに、普通列車が追い抜かれ時間を必要とし、駅停車損失時間を増加させる。

図 2 複線運行方式

Fig. 2. Operation on a double-track line

これに対し、図 2(c) の交互着発運行方式は、各駅に待避設備を設け、普通列車を本線と待避線に交互に発着させることで、必要時隔から駅停車損失時間分を削り、かつ、追い抜きをなくすことで追い抜かれ時間をゼロにして、高密度運行を可能にした。

しかし、この方式で運行できる列車種別は普通列車に限定されるため、速達性を失ってしまう問題点がある。

〈2・2・2〉 複々線運行方式 複々線運行方式は、上下線とも 2 線を優等列車の運行と普通列車の運行に使い分け、速達性を維持しつつ高密度運行を実現した。つまり、図 2(a) の複線を 2 つ使う方式である。しかし、現在、都市内では用地確保などに大きな投資を要する一方、ピーク時の混雑緩和効果が大いとはいえず、全体の輸送需要が減少傾向にあるため、複線から複々線への拡張には、特に費用対効果の面で、多くの都市近郊型路線が厳しい条件に直面している。

また、優等列車の運行と普通列車の運行を単純に分離しただけでは、必要時隔から駅停車損失時間分を削れないこともわかる。本論文で注目したのは、このように、複々線運行方式は、交互着発運行方式と比較して、設備を時間的に十分使い切っているとはいえない点である。

3. 3線運行方式の提案

従来の 3 線運行方式とは、主に諸外国の貨物輸送で使われ、需要の大きい方面や上り勾配で速度が低下する方面に 2 線を使うという、道路交通に近い方法を指している。しかし、鉄道の場合、列車運行密度が上下線で異なれば、両端に車両を滞留する貨物輸送のヤードのような設備と多数の車両が必要になり、本論文で前提としている都市近郊型路線への適用に関しては、実現性がなかった。

本論文で提案する 3 線運行方式は、図 3 のように、駅間は 3 線、優等列車停車駅は 2 面 4 線、通過駅も 4 線の駅配線で構成され、中線の運行方向を優等列車通過駅ごとに逆転させる方式である。なお、中線の運行方向を全て逆としても構成は可能である。

〈3・1〉 運行方法 運行方法は、第 2 章第 2 節で述べた、高密度運行のための交互着発の待避設備の活用、高速運行のための複々線の種別専用運行を応用したものである。 $T_{stoploss}$ 、 $T_{between}$ は、現状の都市近郊型路線に多く見られる値として、ともに 1 分とする。将来、短縮できる場合に関しては、第 7 章で論じることとする。

〈3・1・1〉 単走区間と並走区間 優等列車と普通列車を 1 本/2 分で運行する場合、次の 2 運行区間を設定する。
単走区間 交互着発区間。1 分おきに、異なった種別の 2 本の列車が 1 線を交互に走行する区間。

並走区間 種別専用区間。2 分おきに、異なった種別の 2 本の列車が 2 線を並んで走行する区間。

〈3・1・2〉 区間の切替 優等列車通過駅では、図 4 のように、優等列車と普通列車の運行に普通列車の駅停車損失時間分 (ここでは 1 分) の差が生まれるので、その駅を境界として、単走区間・並走区間を交互に配置する。

単走区間→並走区間 優等列車の 1 分前を走行してきた普通列車が駅で停車した後、駅を通過する優等列車と並んで走行する。図 3、4 の例では、駅 a, e。

並走区間→単走区間 優等列車と並んで走行してきた普通列車が駅で停車した後、駅を通過する優等列車の 1 分後を走行する。図 3、4 の例では、駅 d, f。

さらに、上下線で単走区間・並走区間を互い違いに配置することによって、駅間 3 線で、優等列車 1 本/2 分、普通列車 1 本/2 分の運行を可能にする。

ここで、複々線でも、図 5 のように、後続列車は先行列車の $T_{stoploss}$ に $T_{between}$ を加えた時隔をあけて運行するため、優等列車 1 本/2 分、普通列車 1 本/2 分という駅間 3 線と全く同じ運行しか行えないことに注意してほしい。ただし、複々線では、 $T_{stoploss}$ 、 $T_{between}$ は任意でよい。

図 3 提案する 3 線運行方式の構造

Fig. 3. Structure of the proposed triple-track line

図4 3線運行方式

Fig. 4. Scheduling on a triple-track line

図5 複々線運行方式

Fig. 5. Scheduling on a quadruple-track line

〈3・2〉 端末駅の構造 3線運行方式は、環状でない路線で、高密度運行を行う場合、交互着発複線や複々線と同様に、端末駅での折返が複雑になる。どのような設備が必要なのか、1入線2出線の例を図6に示す。なお、2入線1出線はこれと対称な構造を持つ。同一番線の発着最小時隔2分、端末駅停車損失3分を制約条件とした。

〈3・2・1〉 立体交差を伴う4線化 図6(a)のように、立体交差を設置し、端末駅手前から4線化することで、平面交差支障を防ぐ方法である。

〈3・2・2〉 端末駅の分割 図6(b)のように、端末駅を分割し、平面交差支障を防ぐ方法である。上下2段で分担する方法と前後2駅で分担する方法がある。

〈3・2・3〉 端末のループ化 図6(c)のように、端末のループ化は、平面交差をなくすことになり、分岐器操作の面で特に有効な方法である。複線化して単線ループで折り返す方法や、ループ上に優等列車通過駅を設け半分複線のループで折り返す方法など、様々な方法がある。したがって、無駄なスペースを作らないように、路線に合ったループを設計すればよい。

〈3・2・4〉 路線の分岐 図6(d)のように、路線を2複線に分岐し、折返容量超過を防ぐ方法である。中間駅から他路線への直通運転が行える路線では、有効である。

なお、現状の複々線路線では、主に端末駅の分割と路線の分岐で折返を行っている。

図6 端末駅の構造

Fig. 6. Structure of possible terminal stations

図7 複線・複々線区間を組み合わせることによる変形

Fig. 7. Modification by combining double- and quadruple-track sections

〈3・3〉 複線・複々線区間を組み合わせることによる変形
この運行法は、もちろん、単走区間・並走区間を上下線で同区間に配置しても行える。ただし、この場合は、図7のように、全区間3線ではなく、優等列車通過駅ごとに2線・4線区間が交互に発生することになる。用地確保や優等列車の停車パターンなどを考えた場合、たとえば、優等列車通過駅間が長い区間を2線にし、短い区間を4線にするなど、こちらの方が有利なこともある。なお、3線からの変形は第4章第2節で述べることにする。

4. 3線運行方式の長所と問題点

3線運行方式は、運行の性格上、従来の運行方式と異なる性質を多く持っている。従来の設備やシステムと協調することが本質的に重要な鉄道では、この性質を詳しく検討する必要がある。

〈4・1〉 遅れに対するロバスト性 3線運行方式では、通過合流・通過分離という複々線にはない運行現象がある。そこで、これがどのような設備を必要とするのか、遅れに対するロバスト性に悪影響がないかを検証する必要がある。ここで、遅れ許容時間 T_{delay} を後続列車の走行に影響を与えない、駅での出発遅れ時間の最大値と定義する。この T_{delay} が大きいほど運行の外乱に対するロバスト性が高いといえる。この指標を用いて、3線運行方式の遅れに対するロバスト性を検証した。

Turnout No.	No.12	No.20
L_{wp} [m]	4.970	
L_{ct} [m]	3.800	
l_{pt} [m]	77.397	123.581
l_1 [m]	12.692	18.981
l_2 [m]	45.650	76.153
θ [°]	4°46'	2°51'5''
V_{ip} [m/s]	16.7	25.0

L_{wp} : プラットホーム端幅限界 [m] L_{ct} : 車両接触限界 [m]
 l_{pt} : 分岐器端-ホーム端間距離 [m] V_{ip} : 制限速度 [m/s]

図8 12, 20番 60kg レール両開分岐器寸法と周辺の構造

Fig. 8. Dimension of turnouts No.12 and No.20

分岐器は 60kg レール両開分岐器 (12, 20 番)⁽²⁾、純粹移動閉塞 (前方列車速度を考慮しない移動閉塞)⁽³⁾ を前提として計算した。分岐器周辺の構造は図8の通りである。なお、60kg レール両開分岐器 12 番を用いた場合は、式 (1) 上が成立し、分岐器前で分岐器制限速度まで減速しなければならない。

60kg レール両開分岐器を用いた場合の遅れ許容時間を式 (2)-(4)、駅停車時間を式 (6) に示す。また、比較のために分岐器の必要のない複線・複々線の場合の遅れ許容時間を式 (5)、駅停車時間を式 (7) に示す。

$$V = \begin{cases} V_{ip} & \text{for } \frac{V_{ip}^2}{\beta} < l_{pf} + l_{tr} + 2l_{pt} \\ v & \text{for } \frac{V_{ip}^2}{\beta} \geq l_{pf} + l_{tr} + 2l_{pt} \end{cases} \quad (1)$$

$$T_{delay} = t - \frac{v}{\beta} \left(1 - \frac{V}{2v} + \frac{V^2}{2v^2} \right) - \frac{(l_{pf} + l_{tr})/2 + l_{pt} - l_1 - l_2}{V} + \sqrt{\frac{l_{pf} - l_{tr} + 2(l_{pt} - l_1 - l_2)}{\beta}} - t_{pt} \quad (2)$$

$$T_{delay} = t - \frac{l_{tr}}{v} - \frac{v}{2\beta} \dots \dots \dots (3)$$

$$T_{delay} = t - \frac{l_{tr} + l_1 + l_2}{v} - \frac{v}{2\beta} - t_{pt} \dots \dots \dots (4)$$

$$T_{delay} = \frac{t}{2} + \frac{v}{2} \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \right) - \sqrt{\frac{2l_{tr}}{\alpha}} \dots \dots \dots (5)$$

$$T_s = t - \frac{v}{2} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right) \left(1 - \frac{V}{v} + \frac{V^2}{v^2} \right) - \left(\frac{1}{V} - \frac{1}{v} \right) (l_{pf} + l_{tr} + 2l_{pt}) \dots \dots \dots (6)$$

$$T_s = \frac{t}{2} - \frac{v}{2} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right) \dots \dots \dots (7)$$

- (1): 進入分岐器前減速判定 (交互着発複線・3線)
- (2): 進入分岐器制約 (交互着発複線・3線) [s]
- (3): 進出時制約 (3線) [s]
- (4): 進出分岐器制約 (3線) [s]
- (5): 進入時制約 (複線・複々線) [s]
- (6): 駅停車時間 (交互着発複線・3線) [s]
- (7): 駅停車時間 (複線・複々線) [s]

D-track : 複線運行方式 t : 時隔 [s]
aD-track: 交互着発複線 l_{tr} : 列車長 [m]
T-track : 3線運行方式 l_{pf} : プラットホーム長 [m]
Q-track : 複々線運行方式 v : 巡行速度 [m/s]
 T_{delay} : 遅れ許容時間 [s] t_{pt} : 分岐器転換・確認時間 [s]
 T_s : 駅停車時間 [s]
 L_{st} : 駅設備長 [m] α : 加速度 [m/s²]
 V_{pt} : 分岐器通過速度 [m/s] β : 減速度 [m/s²]

表1 遅れに対するロバスト性
Table 1. Robustness of train scheduling

Track Turnout No.	D-track	aD-track		T-track		Q-track
		No.12	No.20	No.12	No.20	
T_{delay} [s]	40.0	19.8	21.2	19.8	21.2	40.0
T_s [s]	37.8	33.5	37.8	33.5	37.8	37.8
L_{st} [m]	210.0	364.8	457.2	364.8	457.2	210.0
V_{pt} [m/s]	—	16.7	22.2	16.7	22.2	—
t [s]	120.0	60.0	60.0	60.0	60.0	120.0

表2 表1のロバスト性計算のための前提条件
Table 2. Assumptions for the calculation in table 1.

l_{tr} [m]	l_{pf} [m]	v [m/s]	t_{pt} [s]	α [m/s ²]	β [m/s ²]
200.0	210.0	22.2	10.0	1.0	1.0

表1の計算結果を見ると、3線運行方式は、複々線と比べてロバスト性が低いものの、交互着発複線と同レベルであることが確認された。加えて、駅停車時間の約6割程度の遅れまで許容できる。したがって、自動運転の実現など含め、定時運行の技術力が高い日本では、現在の複線緩急結合型高密度運行時の状況と同程度の困難さといえ、提案方式の導入には特に問題はないと考えられる。

さらに、この方式は、中線を両方向運行しているわけではないので、上りの遅れが下りに波及することはない。したがって、高密度単線運行よりは、本質的にロバスト性が高いことが保証されている。

一方、分岐器を必要とするため、必然的に駅設備が長くなってしまう。したがって、駅間が極端に短い路線には、適していない。

また、同様に、環状でない路線では、端末駅折返における遅れに対するロバスト性の検証も重要である。

〈4・2〉 複線区間・複々線区間との接続 部分的に3線化する場合には、境界に折返設備を作り、列車密度を調整する方法もある。しかし、列車密度を維持したまま、複線や複々線といかに接続できるかも、3線運行方式の有用性を高める上で重要である。

この問題は、図9(a), (b)のように、線数が変わる境界駅を上下優等偏向駅、すなわち、優等列車が上下線的一方で通過、もう一方で停車する駅にすることで解決する。

図9 複線区間・複々線区間との接続
Fig. 9. Connection to double-track and quadruple-track

〈4・3〉 間引き運行 日中や休日など、高密度運行の必要のない時間帯では、最密時の運行ダイヤを規格ダイヤとし、これを必要な運行密度にまで単に間引くだけでよい。通常、ダイヤをうまく間引いたとしても、運行密度にむらができ、サービスが極端に悪化する場合があるが、ここでは、優等・普通の両種別で、規格ダイヤがすでに均一かつ高密度であるため、サービスを極端に悪化させる危険性はない。すなわち、偏ったダイヤから列車を間引くと、より偏った運行になる可能性があるが、均一なダイヤから列車を均一に間引けば、均一に運行できる。したがって、運行密度を適切に調整するには、有効な手段である。

また、あるパターンで間引くことで、ある区間の中線、もしくは並走区間側の端線を全く使わずにすむ運行も可能になり、保守などの効率向上・コスト減も可能にする。図10に優等列車と普通列車ともに運行密度を半分に間引き、区間M, Nの並走区間側の端線を使わない例を示す。

〈4・4〉 優等列車通過駅変更に伴う制約 3線運行方式では、ひとつの優等列車通過駅を変更すると、その駅からどちらかの終点まで中線の運行方向を全区間で逆転させなければならない。

また、新駅建設に関しても、新駅を優等列車停車駅にすれば問題ないが、優等列車通過駅にする場合には同様の問題が発生する。

図10 区間M, Nの並走区間側の端線を使わない間引き運行
Fig. 10. Neither using the up-side track in section M nor the down-side track in section N

(4・5) より高速な優等列車運行に伴う制約 より高速な優等列車を運行するためには、複々線では、優等列車の運行密度だけを下げればよい。しかし、3線運行方式では、優等列車と普通列車、両方の運行密度を下げなければならない。

(4・6) 環状路線における優等列車通過駅数制約 環状路線に3線運行方式を用いる場合、優等列車通過駅数が偶数でないと、単走区間と並走区間の配置が一周した時に、つながなくなってしまう。このため、環状路線では、優等列車通過駅数を考慮しなければならない。

(4・7) まとめ 以上を踏まえると、3線運行方式は、駅間の極端に短い路線でなければ、複々線運行方式と比較して、遅れに対するロバスト性を実現性を損ねない程度、犠牲にすることによって、小さな設備で、完全に同等の輸送力が得られるといえる。

さらに、本章第2節と第3節で示した柔軟性は、3線運行方式独自の長所であり、この柔軟性の活用は、3線運行方式の有意性を高めるものである。

また、鉄道では、優等列車通過駅の変更は頻繁に行われるわけではなく、より高速な優等列車の運行による影響もそれほど大きくはない。環状路線で、優等列車通過駅数を絶対に奇数にしなければならないことはないであろうから、本章第4節から第6節で示した3つの制約は、考慮することが必要なだけで、致命的な問題点にはならない。

5. 3線運行方式の輸送力増強効果の検証

さて、3線運行方式によって、複々線同等の高速・高密度運行が可能になることがわかったが、現実的有意性を確認するには、実際の輸送力増強効果を調べる必要がある。

そこで、混雑が問題になっている都市近郊型路線であり、イベント開催時の多客輸送実績⁽⁴⁾もあるJR京葉線を例にとり、様々な時間帯や場面を想定して、旅客全体に対する評価をし、路線の3線化が、どの程度効果があるのかを検証した。乗降客数・混雑率のデータ⁽⁵⁾から、OD[†]を推定し、優等列車停車駅などの諸条件は変化させず、全旅客の損失時間^{††}の和 $\sum T_{loss}$ ・必要編成数 N_{train} ・最大混雑率 C_{maz} ・イベント客輸送必要時間 T_{sweep} を計算した。朝・日中・夕方の各時間帯で評価した結果を表3、会場の最寄り駅が海浜幕張駅である各種イベントが開催された場合に評価した結果を表4に示す。

図 11 JR 京葉線

Fig. 11. JR Keiyo line

[†] 出発駅 (Origin)-到着駅 (Destination) 間の単位時間の旅客数

^{††} 実際に乗客が出発駅に来てから目的駅に着くまでかかる時間と、乗客が出発駅に来てすぐ無停車で目的駅に行くとした場合にかかる時間との差

朝 列車運行密度を可能な限り高くして計算。
日 中 列車運行密度を現状と同じとして計算。
夕 方 列車運行密度を可能な限り高くして計算。

表 3 1日の時間帯別評価

Table 3. Evaluation in a day

	D-track	aD-track	T-track	Q-track
Morning				
$\sum T_{loss}$ [min/1h]	515378	492589	311384	311384
[%]	100.0	95.6	60.4	60.4
N_{train}	34	100	91	91
C_{maz} [%]	312.2	51.8	96.1	96.1
Daytime				
$\sum T_{loss}$ [min/1h]	207184	215529	206975	206975
[%]	100.0	104.0	99.9	99.9
N_{train}	20	20	20	20
C_{maz} [%]	63.5	49.8	63.5	63.5
Evening				
$\sum T_{loss}$ [min/1h]	422922	385030	248913	248913
[%]	100.0	91.0	58.9	58.9
N_{train}	34	100	91	91
C_{maz} [%]	182.7	35.6	61.8	61.8

大イベント 10万人規模のイベントを想定。

小イベント 2万人規模のイベントを想定。

表 4 イベント終了時における評価

Table 4. Evaluation when an event was held

	D-track	aD-track	T-track	Q-track
Large event				
$N_{spectator}$	100,000			
$\sum T_{loss}$ [min]	8193358	5786786	4185324	4066326
[%]	100.0	70.6	50.8	49.6
N_{train}	34	41	64	62
T_{sweep} [min]	537	144	107	107
Small event				
$N_{spectator}$	20,000			
$\sum T_{loss}$ [min]	206352	177978	99998	99998
[%]	100.0	86.2	48.5	48.5
N_{train}	19	20	22	22
T_{sweep} [min]	19	7	9	9

D-track : 複線運行方式

aD-track : 交互着発複線

T-track : 3線運行方式

Q-track : 複々線運行方式

$N_{spectator}$: イベント観客数

$\sum T_{loss}$: 1時間あたりの損失時間の和 [min/1h]

N_{train} : 必要編成数

C_{maz} : 最大混雑率 [%]

T_{sweep} : イベント客輸送必要時間 [min]

3線運行方式は、表3の評価結果から、朝・夕方の混雑時に、複線運行方式と比較して、損失時間とを約6割に短縮するとともに、最大混雑率を約3割に低減し、速達性向上と混雑緩和の両立に大きな効果があることがわかる。

また、表4の評価結果からは、イベント終了時の輸送でも、イベントの規模によらず、損失時間とを約半分に、イベント客輸送必要時間も短縮できることがわかる。

つまり、駅間が3線であっても、優等列車と普通列車を複々線と全く同じ密度で運行できるため、大きな効果を生むことが検証された。

また、日中は、混雑が問題になっていない時間帯のため、列車密度を固定して評価したので、有意な結果は得られなかった。この時間帯の輸送力確保だけを考えれば、3線運行方式や複々線運行方式は、設備を持て余している状態に見えるが、この時間帯を保守作業にあてるなど、有効に使うことで、設備余裕としての有効活用は可能である。

大イベント終了時には、海浜幕張駅での停車損失を他駅より長く設定したため、3線運行方式に、わずかな追い抜け損失が発生し、完全には一致しなかったが、複々線運行方式と同程度の効果があったといつてよいであろう。

6. 複々線と比較して線路あたりの容量向上が可能となる本質的理由

さて、ここで駅間1線分の設備の差がなぜ輸送力の差を生みださないのかを説明する。

複線では第2章第1節で示したように、通過と停車の混在が列車密度の低下をもたらした。複線2つと考えられる複々線も同じで、優等列車と普通列車の運行を分離して、通過と停車の混在を防ぎ、高速・高密度運行を可能にした。これとは逆に、本論文で提案する3線運行方式は、待避設備と中線を利用し、通過と停車の混在を列車密度の向上に役立てる。この点が従来の運行法と大きく異なる点である。

具体的に説明すると、列車運行密度と速達性は、列車の走行過程における速度の変化、特に、減速・停車・加速を伴う駅前後の運転曲線によって決定づけられる。

簡単のために、余裕時間を無視し、20番の60kgレール両開分岐器と表2と同一の条件を用いて計算した駅前後の運転曲線を図12に示す。

図12(a)のように、先行列車が本線を発車した後に、後続列車が本線に停車する際には、多くの時間を必要とする。すなわち、ここでは、設備を時間的に十分使い切っているとはいえず、列車密度の低下は不可避である。

これに対して、図12(b)のように、先行列車が待避線に停車した後に、後続列車が本線を通過、もしくは停車する場合、図12(c)のように、先行列車が待避線を発車した後に、後続列車が本線を通過する場合の方が、列車密度を高くできることは明らかである。ここに注目して、待避設備と中線を効果的に使い、線路あたりの輸送力向上を図ることができたのである。

7. 3線運行方式の検討に基づく

交互着発複線運行方式の長期的展望

本論文では、現状の技術レベルと都市近郊型路線を前提とすることで、駅停車損失時間 $T_{stoploss}$ と安全余裕時間 $T_{between}$ を両方とも1分とし、3線運行方式では、複々線と同じ、優等列車1本/2分、普通列車1本/2分の運行が可能になると考えてきた。

図12 駅前後の運転曲線

Fig. 12. Run curves near stations

図13 安全余裕時間の短縮を前提とした将来の複線高速・高密度運行方式

Fig. 13. Rapid and frequent service on a double-track line on assumption of reduced $T_{between}$

鉄道技術が今後急速に進歩することを考えれば、加減速度の向上・多扉車両の積極導入・自動運転の発展などによって $T_{stoploss}$ の短縮、保安システムの改良・移動閉塞や車上分岐の実現などを通じて、 $T_{between}$ の短縮が図られるだろう。

しかし、駅停車時間 T_s 、つまり、乗客の乗降に必要な時間は、将来を考えても大きくは短縮できないと考えられる。したがって、式 (8)、(9) から、 $T_{stoploss}$ よりも、 $T_{between}$ の方が大きく短縮されると思われる。

$$T_{stoploss} = T_s + \frac{v}{2} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$T_{between} = \frac{l_{pf}}{v} + \frac{v}{\beta} - \sqrt{\frac{2(l_{pf} - l_{tr})}{\beta}} + t_{pt} + t_{mg} \quad (9)$$

t_{mg} : 予め考慮しておく余裕時間

そこで、 $T_{between}$ の大幅な短縮を想定し、本論文で提唱した基本的な考え方を応用すれば、将来は、今の交互着発可能な複線の設備で、複々線で技術的に可能となる列車運行とはほぼ同じ列車運行ができる可能性がある。

たとえば、 $T_{between} = 25[s]$ 、 $T_{stoploss} = 50[s]$ が可能になった場合、図 13 のように、優等列車 1 本/75 秒 (複々線では 1 本/75 秒)、普通列車 1 本/100 秒 (複々線では 1 本/75 秒) の運行が可能になる。

8. 結 論

複々線化し、線路を種別専用にすることで、優等列車・普通列車の両種別の高速・高密度運行が可能となることはよく知られている。これに対し、本論文では駅間が 3 線でも、乗客から見れば複々線とほぼ同じ性能の列車運行が実用的に可能であることを示した。

厳密にいうと、3 線運行方式が複々線運行方式と完全に同等となるには、上下線全駅における駅停車損失時間と上下線全区間における安全余裕時間が完全に等しく、列車によって駅間所要時間が異ならないことが必要となる。

現実の都市郊外型路線を見ると、駅停車損失時間と安全余裕時間とも約 1 分に設定されている場合が多い。また、車両の性能はほぼ同じで、駅間距離が比較的短く、踏切やカーブによる速度制限などで、車両による走行差が生まれにくい。すなわち、現実の都市郊外型路線の多くは 3 線運行方式を適用できる条件を備えている。

一方、駅停車損失時間と安全余裕時間が異なることが想定されるのは、安全余裕時間の大幅な短縮が見込まれる将来である。その際には、交互着発可能な設備を持つことを前提に、駅間が複線、すなわち、さらに小さな設備でも輸送力の画期的増強が可能となることも示した。

今後は、「複線の次は複々線」と、単純に優等列車と普通列車の運行を分離することで輸送力増強を図るのではなく、優等列車と普通列車の運行を組み合わせ、より小さな設備で高速・高密度運行を実現することが望ましく、時代の要請に合うと筆者は確信している。

(平成 12 年 11 月 20 日受付, 同 13 年 2 月 6 日再受付)

- (1) 豊田 直幸, 曾根 悟: 「三線化によるダイヤの改善」平成 3 年電気学会全国大会, No.680, pp.(6-173)-(6-174), 1991-3.
- (2) 「新 停車場線路配線ハンドブック」停車場線路配線研究会 1995-7.
- (3) 奥村 幾正: 「移動閉そくシステム」鉄道と電気技術 Vol.6, No.7, pp.87-92, 1995-7.
- (4) 大長 順一: 「京葉線の歩みと 20 万人ビッグコンサートに伴う多客輸送」運輸協会誌 483 号 pp.27-30, 1999-9.
- (5) 「平成 10 年度版 都市交通年報」財団法人運輸経済研究センター 1999-3.

勝 田 敬 一 (学生員) 1976 年 9 月 21 日生まれ。1999 年東京大学工学部電気工学科卒業。現在、同大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程に在学中。交通システム工学の研究に従事。電気学会学生員。

古 関 隆 章 (正員) 1963 年 7 月 29 日生まれ。1992 年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同大学工学部講師、助教授を経て、現在、同大学工学系研究科電気工学専攻助教授。工学博士。電気機器制御の交通・輸送分野への応用の研究に従事。電気学会、IEEE、VDI 会員。

曾 根 悟 (正員) 1939 年 4 月 23 日生まれ。1967 年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同大学工学部講師、助教授、教授を経て、現在、工学院大学電気工学科教授。工学博士。専門は交通システム工学とパワーエレクトロニクス。電子情報通信学会、日本鉄道技術協会会員。