

列車遅延と列車保安制御装置*

石合光雄** 新木元治* 荒井竜三*

1. まえがき

列車運転においては当然遅延の発生が予想されるので、ダイヤには余裕時間が与えられている。列車の運転時隔が短くなければ、基準運転時間に対し、ある値の余裕時間を附加することにより、ダイヤは守られる。しかしながら、たとえば、東京の通勤時間帯におけるごとく、運転時隔が極端に短縮された線区での遅延の発生は、その列車の以後の運行は阻害され、また同時に、後続列車に対しても遅延が伝播して、混乱を招くことがある。従って、上の余裕時間に対し、運転時隔上での余裕時間、すなわち、余裕時隔が考えられる。

以下は、運転時隔が短縮された線区での、遅延の伝播と、その列車保安制御装置との関係、ならびに、余裕時隔の基準について論じたものである。

2. 遅延線

はじめに、列車の運転をできるだけ簡単に表現するために、次のような仮定をおく。

- 1° 列車の運転速度は一定値 v_0 とする。
- 2° 列車の加速度、減速度は、それぞれ α 、 β とし、1条件についてはおのおの固定される。
- 3° 閉そく区間長（信号機の建植間隔）を次のように定める。

$$l_2 = a + (v_0^2 / 2\beta)$$

$$l_3 = a + (v_0^2 / 2 \times 2\beta)$$

$$l_4 = a + (v_0^2 / 2 \times 3\beta)$$

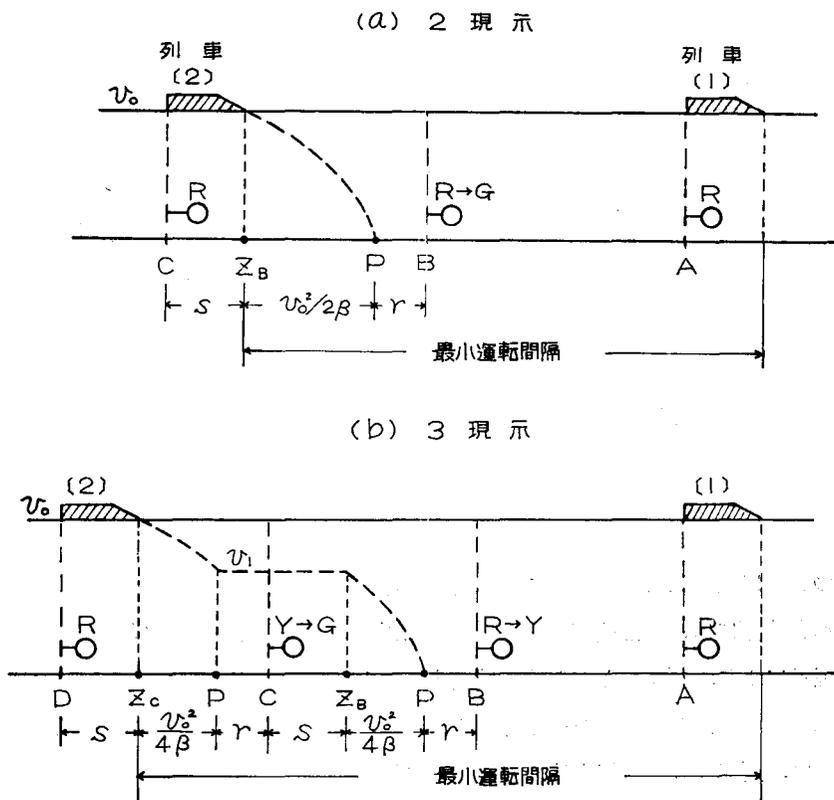
ここに、 l_2 、 l_3 、 l_4 はそれぞれ、2、3、4信号現示方式における閉そく区間長、 a は余裕距離とする。

- 4° 3現示以上の信号現示における中間の制限速度は、 v_0 より0までのブレーキ距離を基準とする。すなわち、3現示では、その距離の1/2に相当する速度 v_1 を、また4現示では、3等分して、それに相当する速度の高い方より v_1 、 v_2 とし、これを中間制限速度とする。
- 5° 停止信号現示の信号機に対しては、列車は絶対に停止するものとし、また、このときのブレーキ開始点および停止地点は固定されているものとする。
- 6° 信号機の現示変化に要する時間は考えない。また、その他の機器のおくれ時素とみられる

1964年5月15日 第15回OR学会研究発表会講演「経営科学」第8巻第4号、

**国鉄、札幌鉄道管理局、*同、鉄道技研

第1図 最小運転間隔



$$s+r=a \text{ (余裕距離) } \quad \text{この場合 } s=l_T \text{ (列車長)}$$

時間はすべて α , β の中に含めて考える。

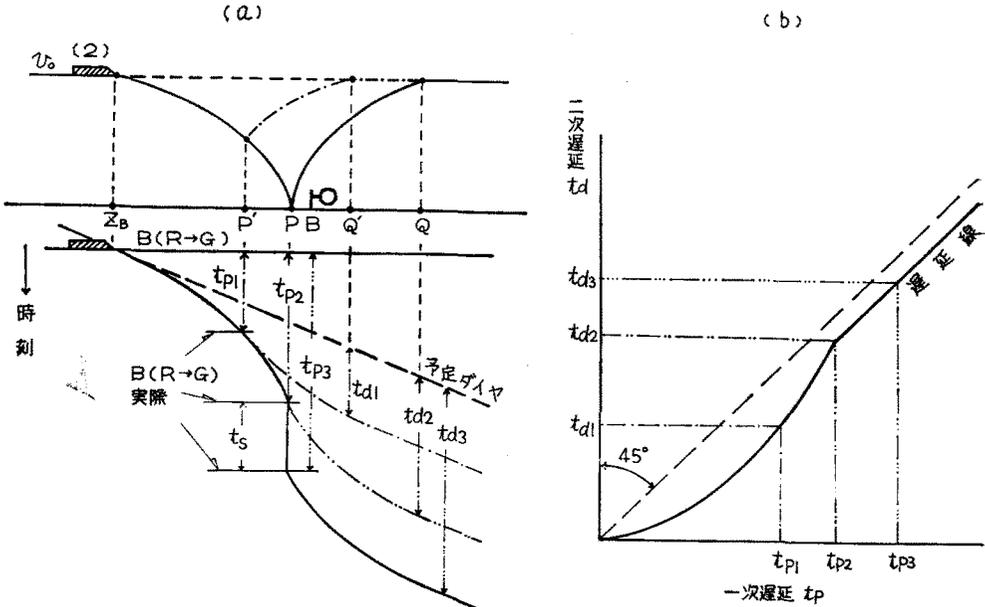
かくして、列車の最小運転間隔が第1図のごとく定まる。(a)は2信号現示方式の場合を示し、(b)は3信号現示方式の場合を示す。(横軸に距離を、縦軸に速度をとり、A, B, C, ...は信号機を示す。信号現示は、2現示では停止R, 進行Gを、3現示では、これに中間の制限現示Yを加える。)

信号機の制限現示に遭遇することなく運転する平常の場合には、上の間隔が最小となる。このときの時間間隔を最小運転時隔と呼び、一般の場合には、これに余裕時間が附加されたものとみなす。以下は、この最小運転時隔にて走行する列車群を対象として論を進め、一般の場合に拡張する。

まず、遅延線概念を示す。(2現示, 第2図参照)

信号機Bはその防護する閉そく区間に、列車〔1〕が存在する間はRを現示し、列車がこの区間を通過し終ればGを現示する。いま、列車〔1〕がこの区間を通過し終った瞬間、Bが突然

第2図 遅延線 の 概念



故障してRのままになったとする。※ これは列車〔2〕に対する遅延の原因となる。BがR→Gの現示変化すべき時刻には、当然列車〔2〕は、Bに対するブレーキ開始点 Z_B にまで進入していて、BのR現示により、ブレーキをかけ、減速することになるからである。減速中に故障が回復すれば、列車〔2〕はただちにブレーキをゆるめ、加速して元の速度に戻される。また、この故障が長くなれば、列車〔2〕は停止地点・図のPに停止し、Bの回復を待つことになる。

信号機Bの故障時間 t_p に対し、列車〔2〕が減速し、加速して元の速度 v_0 に戻ったとき、ダイヤよりの遅延時間 t_a は、等速運転される列車の所要時間との差として、次のごとく計算される。

$$\begin{aligned}
 t_a &= (v_0 - v_a) \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right) - \frac{1}{2v_0} (v_0^2 - v_a^2) \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right) \\
 &= \frac{1}{2v_0} (v_0 - v_a)^2 \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right) \\
 \therefore t_a &= \frac{1}{2v_0} (\beta t_p)^2 \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right) \dots\dots (t_p < \frac{v_0}{\beta}) \\
 t_a &= \frac{v_0}{2} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right) + t_s \dots\dots (t_p = \frac{v_0}{\beta} + t_s)
 \end{aligned}$$

ただし、 $v_a = v_0 - \beta t_p$ 、 t_s は停止時間である。

t_p を一次遅延、 t_a を二次遅延と呼び、それぞれ横軸、縦軸にとると、第2図 (b) に示すとき曲線を得る。これは、最小運転時隔にて運転される列車の、信号機の故障時間 (原因遅延)

※注 列車自体の故障あるいは、線路上の障害物により列車が停止または減速したことを、信号機の故障として表現するのである。

に対する列車の遅延時間（結果）を示すもので、遅延線と名づける。第3図に2現示、第4図に3現示での遅延線の1例を示す。

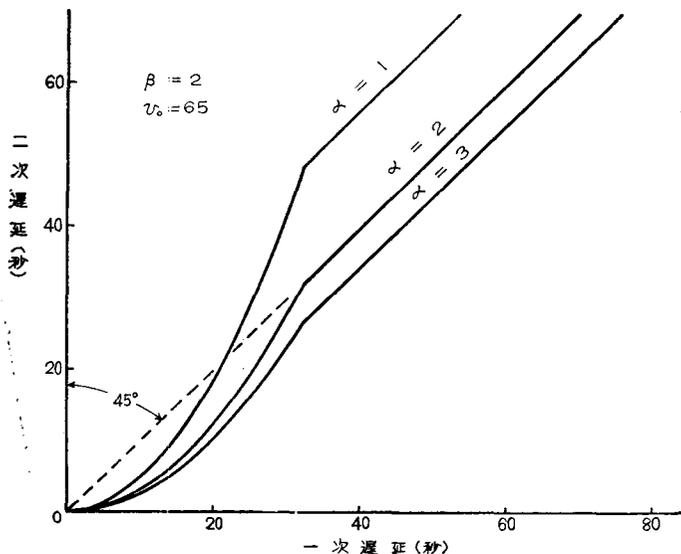
遅延線は、第3図、第4図にみるごとく、一般に複雑な形をとるので、簡単な形とするために、原点を通る直線で近似し、その方向係数をとって、新たに遅延線とした。遅延線は、 α 、 β 、閉そく区間長、速度等の定数によって変動し、また、最小運転時隔に対する余裕時隔の挿入によって右に平行移動する。

なお、上に示した遅延線は、信号機の故障時間に対する列車の遅延時間であるが、列車が遅延することにより、その後方の信号機もその現示変化が遅延することになり、列車の場合と同様に、信号機の遅延線が考えられる。しかしながら、故障信号機を通過し終わるまでに速度が回復する場合には、信号機の遅延線は列車のそれと同一であり、そうでない場合でも差は小さいので、遅延線を直線とすることにより、上の遅延線によって、列車と、その後方の信号機との両者の遅延線を同時に表わすものとする。

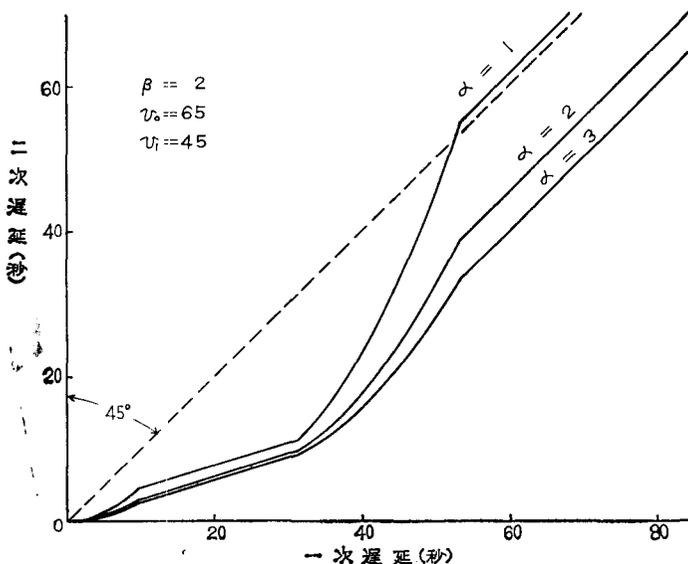
3. 遅延伝播（第1図および第2図参照）

信号機Bの故障時間を t_1 とし、遅延線を第5図の直線として、その方向係数を k ($k < 1$)と

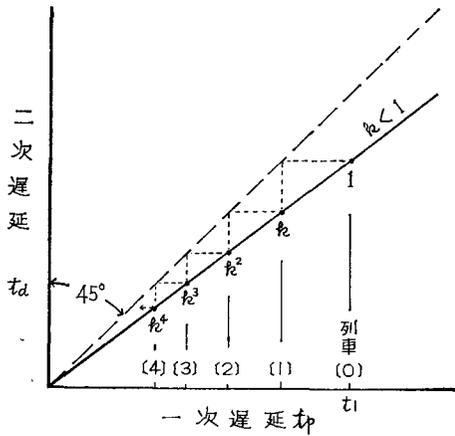
第3図 遅延線（2現示）



第4図 遅延線（3現示）

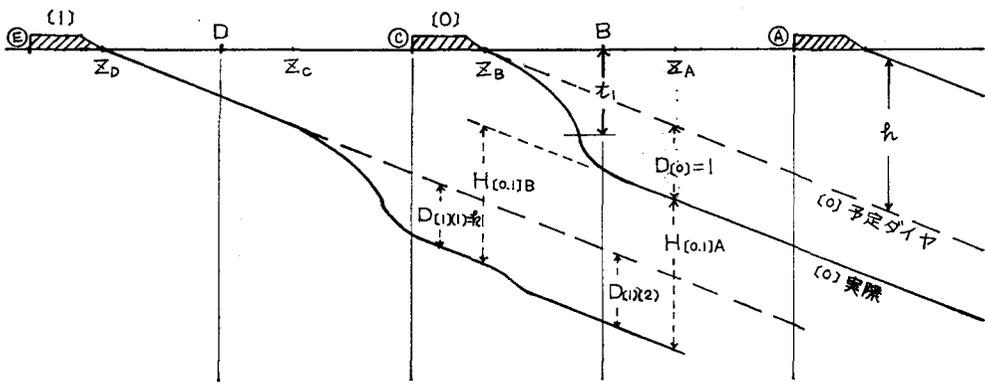


第5図 遅延伝播



によって、遅延 k をもつ。同様に、信号機Dは遅延 k をもち、列車〔2〕はこれをうけて、 k^2 の遅延を生じ、また、列車〔3〕は信号機Eにおいて k^3 の遅延を生ずることになる。この様子を第5図に示す。かくして、 $k^m \approx 0$ となる列車〔 $m-1$ 〕まで遅延は伝播し、列車〔 m 〕以降の列車には遅延は伝播しないということが出来る。つぎに、各列車のその後の運行はどうなるであろうか。

第6図 後続列車の遅延



最小運転時隔を h とすると、列車〔0〕が遅延1をもった後は、その先行列車との運転時隔は $h+1$ となり、仮定1°により、終着駅まで保たれる。列車〔1〕は信号機Cにおいて遅延 k となり、信号機Bのブレーキ開始点 Z_B に達したとき、列車〔0〕との運転時隔 $H_{(0,1)B}$ ※が第6図に示すごとく、 $h+k-1$ となって、 $H_{(0,1)B} < h$ となる。従って、Bはさらに $h-H_{(0,1)B}$ ※の間Rのままである。このため列車〔1〕は減速させられ、 $k(h-H_{(0,1)B})$ の遅延を新たに生じ、C

※注 $H_{(0,1)B}$ は信号機Bにおける列車〔0〕と列車〔1〕との運転時隔を示す。以下同じ。

する。また、信号機Bの故障に最初に遭遇した列車を列車〔0〕とし、以下その後方へ列車〔1〕、列車〔2〕、……と続くものとする。

列車〔0〕は信号機BのR現示により、減速し、 t_1 後、加速して v_0 となったとき、遅延線により、 $k \cdot t_1$ の遅延を生ずることになる。いま、この遅延時間 $k \cdot t_1$ を単位の遅延とし、1とおく。遅延線の仮定によれば、信号機Cも1の遅延をもつことになる。最小運転時隔では、列車〔1〕がCのブレーキ開始点 Z_C に達したとき、Cは1の遅延を与えることになる。従って、列車〔1〕はこれをうけて、減速し、加速すること

での遅延と合せて $k+k(1-k)$ の遅延となる。さらに、 Z_A に達したとき、 $H_{(0,1)A}=h-(1-k)^2 < h$ となるので、 A により $h-H_{(0,1)A}$ の遅延を与えられ、ダイヤよりの遅延は $k+k(1-k)+k(1-k)^2$ となる。以後の信号機においても同様な過程をとることになるので、列車〔1〕のダイヤよりの遅延 $D_{(1)}$ は次のごとく示される：

$$D_{(1)}=k+k(1-k)+k(1-k)^2+\dots\dots$$

いま、列車〔1〕に対して、信号機Cを信号機(1)と数え、それ以後の信号機、B、A、……を(2)、(3)、……と数えることにすれば、信号機(n)の遅延をうけた後での列車〔1〕のダイヤよりの遅延 $D_{(1)(n)}$ は次式で表わされる：

$$D_{(1)(n)}=k+k(1-k)+k(1-k)^2+\dots\dots+k(1-k)^{n-1}$$

同様にして、列車〔2〕に対して、信号機Dを信号機(1)とおくことにより、

$$D_{(2)(n)}=k^2+2k^2(1-k)+3k^2(1-k)^2+\dots\dots+nk^2(1-k)^{n-1}$$

として表わされ、また、列車〔3〕に対し、信号機Eを信号機(1)とすることにより、

$$D_{(3)(n)}=k^3+3k^3(1-k)+6k^3(1-k)^2+\dots\dots+n(n+1)k^3(1-k)^{n/2}$$

として表わされる。全く同様にして、列車〔m〕に対して、信号機Bよりm-1本後方の信号機を信号機(1)とすることにより、列車〔m〕が、信号機(n)の遅延をうけた後における、ダイヤよりの遅延 $D_{(m)(n)}$ を次式で表わすことができる：

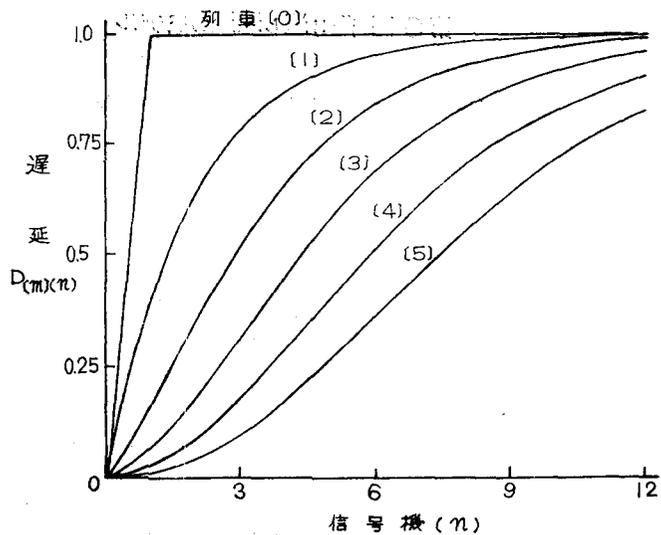
$$D_{(m)(n)} = \sum_{n=1}^n ({}_nH_{m-1}) k^m (1-k)^{n-1} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 ${}_nH_{m-1} = {}_{m+n-2}C_{m-1}$ である。

第7図に $n=0$ からの上式の1例を示す。図から明らかのごとく、(1)式は n を大とすることにより1に収れんする。従って、遅延をうけた全列車は、最小運転時間以内の運転が行なわれ、各信号機に遭遇するごとに遅延を生じて、遅延時間1に近づく。

$k=1$ の場合には、 $k^m = 1$ 、 $(m=0, 1, 2, \dots)$ であるから、信号機Bにおいて列車〔0〕が1の遅延

第7図 遅延の形(2現示)



を生じたとき、信号機Cにおいて列車〔1〕、信号機Dにおいて列車〔2〕と、各信号機ごとに

列車〔0〕と同量の遅延を生ずるが、運転時隔は元と変りはない。

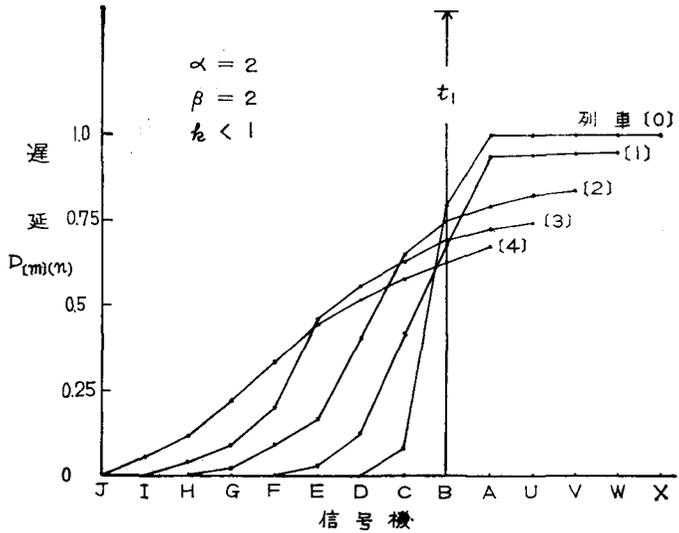
また、 $k > 1$ の場合には、 k^m は非常に大きな値となるので、列車は後方にゆくに従い大きな遅延を生じ、遂には運休列車を必要とする。従って、運転時隔を短縮しても、 $k > 1$ となつてはならないということがいえる。

以上2現示について述べたが、3現示でも全く同様

に考えることができる。1例として、 $k < 1$ における $D_{[m](n)}$ の値を作図により求めて、第8図に示す。

かくして、最小運転時隔で運転される列車群に発生した遅延は、(1)式の形をとるものといふことができる。

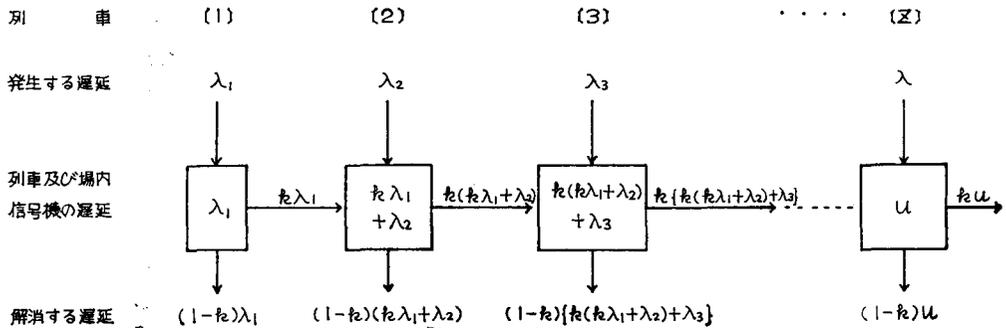
第8図 遅延の形(3現示)



4. 繰り返し遅延

列車は駅に停車し、駅が遅延を繰り返し発生させる場合を考える。

第9図 繰り返し遅延のモデル



閉そく区間長はすべて等しいものとし、遅延線は $k (< 1)$ とする。そこで、第9図に示すモデルを考える。すなわち、列車〔1〕は遅延0にて駅に到着したが、駅で遅延 λ_1 を生じて出発した。列車〔1〕の遅延 λ_1 は、駅の場合内信号機に λ_1 の遅延を与える。列車〔2〕は場内信号機の遅延をうけて、遅延線により、駅到着が $k\lambda_1$ の遅延となった。従って、列車〔1〕の遅延 λ_1

に対して、列車〔2〕では $(1-k)\lambda_1$ の遅延が解消したことになる。ここで、列車〔2〕は新たに遅延 λ_2 を生じ、結局、遅延 $k\lambda_1 + \lambda_2$ となって駅を出発した。同様に、列車〔3〕は、駅到着が $k(k\lambda_1 + \lambda_2)$ の遅延をもち、この間に $(1-k)(k\lambda_1 + \lambda_2)$ の遅延が解消し、新たに λ_3 の遅延を生じて、結局、 $k(k\lambda_1 + \lambda_2) + \lambda_3$ の遅延となって駅を出発した。一般に、列車〔z〕は場内信号機の遅延をうけて駅に到着し、駅で新たに λ の遅延を生じたため、遅延 u となって、駅を出発したものとする。これは、列車〔z+1〕に対して ku の遅延を生じさせ、この間 $(1-k)u$ の遅延を解消したものともみることができる。

駅停車の列車を含む列車群の最小運転時隔は、駅中間を走行する場合のそれよりも大であるので、列車の遅延がこの差を超えなければ、続行列車は場内信号機よりも手前の信号機の遅延をうけることはないので、上のモデルは成り立つ。

そこで上のモデルに対し、次の条件による出生死滅過程を適用することができる。すなわち、列車はすべて、最小運転時隔の等間隔で進入するものとし、この駅の場内信号機にてはじめて遅延の影響をうけるものとする。駅における、各列車に対する新たな遅延の発生は、平均値 λ なるポアソン分布に従うものとし、列車の遅延が u なるとき、続行の列車に対して、平均値 $u(1-k)$ なるポアソン分布に従う遅延の解消があるものとする。

かくして、各列車に対する遅延の期待値が求められ、次のごとく表わされる¹⁾。

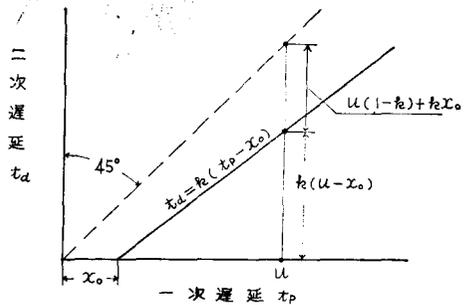
$$M(z) = \frac{\lambda}{1-k} \{1 - e^{-(1-k)z}\} + i e^{-(1-k)z} \dots (2)$$

ここに、 $M(z)$ は z 本目の列車に対する遅延の期待値、 i は $M(z=0)$ である(詳細については参考文献4を参照されたい)。

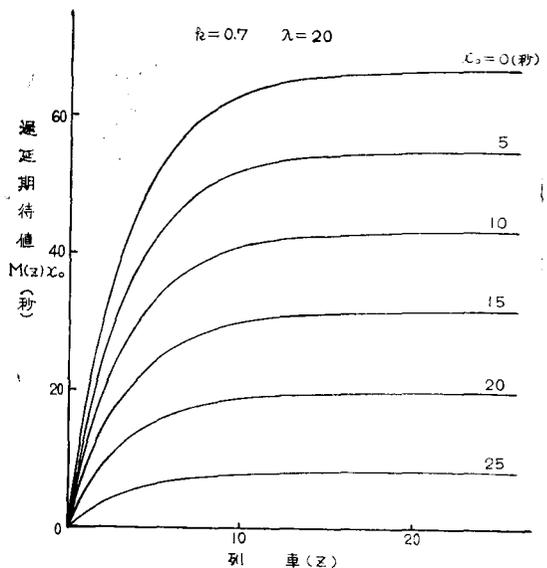
運転時隔に余裕時隔の挿入されている場合には次のごとく導かれる。

遅延線は余裕時隔によって右に平行移動するから、これを x_0 とすれば、第10図に示すごとく、 $t_a = k(t_p - x_0)$ の形となり、遅延 u なるとき、 $u(1-k) + kx_0$ の解消が期待される。従って、遅延の発生は、 $\lambda - kx_0$ となり、このときの遅延の期待値 $M(z)x_0$ は次式で示される：

第10図 余裕時隔をもつ遅延線

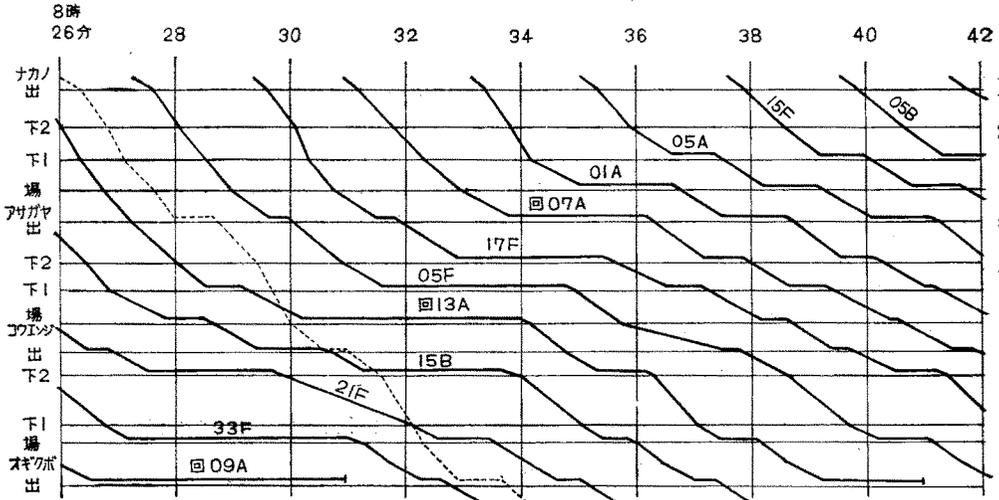


第11図 遅延の期待値



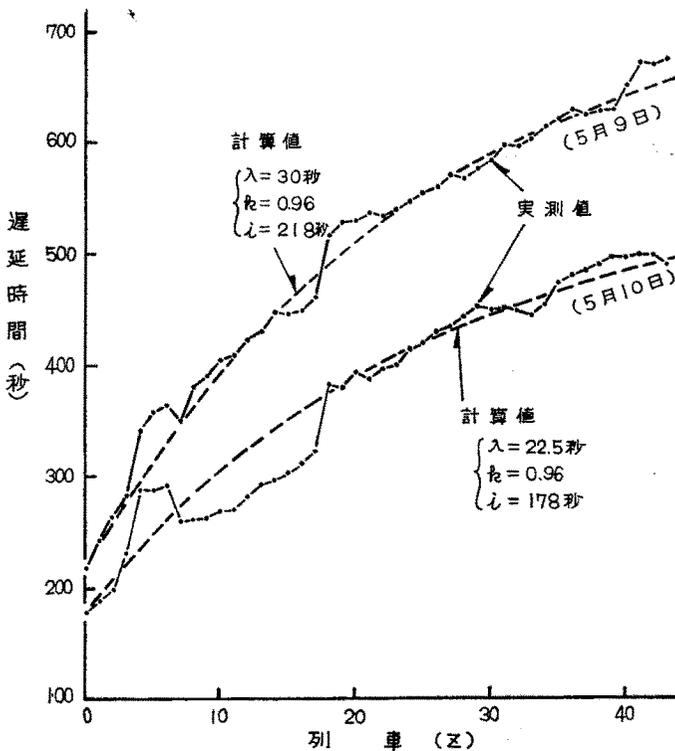
$$M(z)x_0 = \frac{\lambda - kx_0}{1+k} \{1 - e^{-(1-k)z}\} + i e^{-(1-k)z} \quad \dots\dots(3)$$

第12図 遅延ダイヤの例



出=出発信号機、場=場内信号機、下2・下1=下り2・下り1閉そく信号機、回=回送、09A等は電報番号を示す
(破線は標準ダイヤ=参考)

第13図 遅延実測値(1)



$i = 0$ とし、 $k = 0.7$ 、 $\lambda = 20$ を(3)式に代入して、 x_0 に対する遅延の変化を第11図に示す。

列車遅延の実際

自動信号方式における実際の列車運転では、特定の信号機(絶対信号機=場内信号機、出発信号機等)を除き、一般の信号機(閉そく信号機)のR現示に対しては、列車は一旦停止し、ある時間経過後、一定速度以下にての進入が許されている(無閉そく運転と呼ばれる)。また、閉そく区間長は一般に、駅付近で短く、駅中間では長くなっていて、等閉そく区間長ではない。これらを考慮に入れて次の測定を行った。

(1) 昭和37年中央線荻窪駅構内に、制限速度 25 km/h、距離80mの徐行区間が発生した。中央線では、午前の通勤時に、

第14図 遅延実測値(2)

10両編成(列車長200m)、2分時隔の運転が行われるので、この徐行により遅延が発生した。第12図は中野-荻窪間下り線の各信号機ごとに測定した電車の通過時刻を列車ダイヤとして記録したものの1例である。

回09A電車の荻窪駅折り返しが長びき、これが後続電車への遅延伝播を示している。またこのために、ほとんどの電車は荻窪駅場内信号機で停止させられるので、運転時隔は2分以上となり、繰り返して遅延が発生したものと推定される。なお、後続電車への遅延伝播は、21F電車が無閉そく運転を行なっているので、形がくずれている。

荻窪駅出発信号機での通過時刻を基準として、ダイヤよりの遅延を求めると第13図のごとくなり、これに(2)式を適用すると、 $\lambda=30$ 、 $k=0.96$ 、 $i=217$ としてよく合った値が得られる。なお、同図に示した他の測定値

も考慮に入れて、荻窪駅での徐行により、下り線については、毎日、2分時隔運転時に、平均値20~30秒の遅延が発生したものと推定され、また、この地点における遅延線の値もこの程度と推定される。

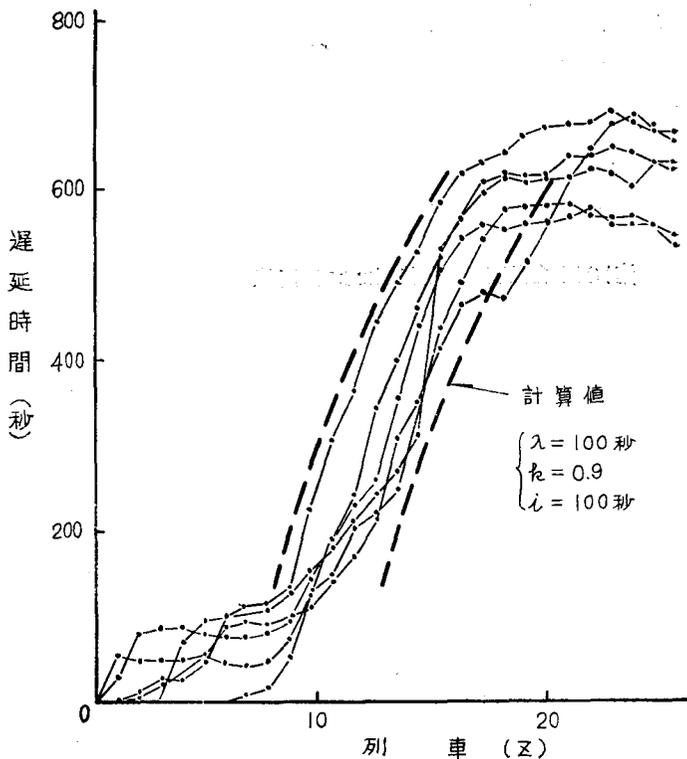
なお、回09A電車の折り返しが遅延したのは、上り線の遅延によるものであり、上り線においても同程度の支障は生じていたものと思われるが乗客の混雑による遅延との判別が困難であると考えたので、下り線についてのみ測定したものである。

(2)第14図は、中央線中野駅の上り場内信号機を通過する2分時隔運転の電車の時刻を実測し、そのダイヤに対する遅延時間を示したものである。この値には中野以前の遅延を合算したものと考えられ、これら数駅を含めた系としての遅延の期待値を計算すると、 $\lambda=100$ 、 $k=0.9$ 、 $i=100$ を(2)式に代入することにより、図のごとくよくあった値が得られる。なお図の初めと終りの部分は、乗客の混雑度が変りつつある時刻とみられ、(2)式の適用されるのは、中間の10本程度の電車についてのみと考えられる。

5. 列車遅延と列車保安制御装置^{2) 3)}

東海道新幹線における自動列車制御装置をはじめとして、国鉄各線それぞれに、いくつかの列車保安制御装置が設置された。これらは、もちろん、保安上の要請によるものであるが、列車の運転密度の高い線区にあっては、遅延により生ずるダイヤの混乱に対しても考慮すべきものと考ええる。

以下は、これらの中、代表的装置である自動列車制御装置および車内信号装置について、列車

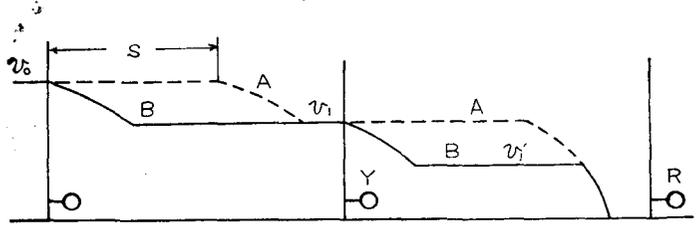


遅延上よりの検討を試みたものである。

(1) 自動列車制御装置

一般に、自動列車制御装置の設置された線区での列車の運転は、第15図のA線に沿った運転曲線を描くのに対し、在来の乗

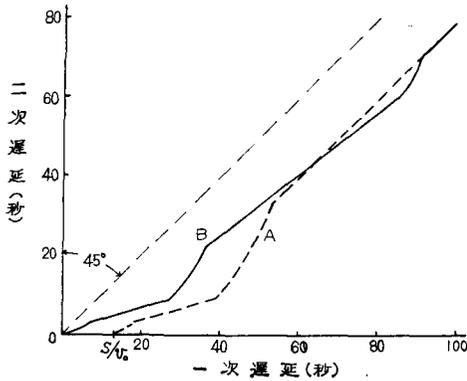
第15図 自動列車制御装置による運転曲線



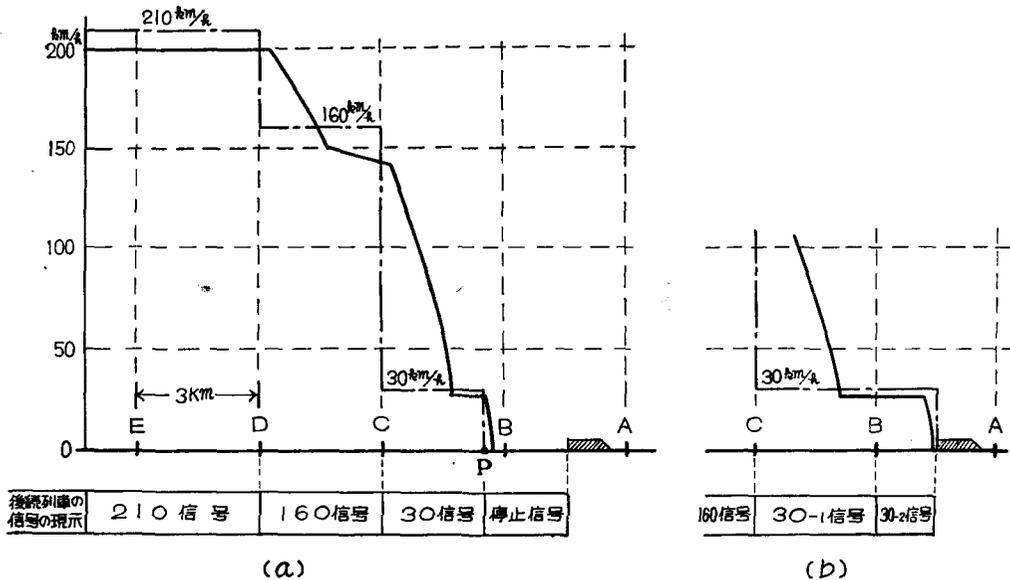
務員を主体とした運転では、同図B線に沿ったものとなる。また、このときの遅延線は第16図のそれぞれA線、B線のごとくなる。従って、運転時隔の短い線区には、乗務員を主体とする運転の方が、遅延伝播の上からは有利であるといえる。

自動列車制御装置の設置は保安上の問題であるが、短小運転時隔線区には、上の不利を克服するために、接近継電器を設置するなどして、できるだけB線に近づけた運転方式とすることが、遅延に対しては望ましい。

第16図 自動列車制御装置による遅延線



第17図 新幹線のP点制御



新幹線の自動列車制御装置による運転では、当初第17図(b)に示すごとく、故障等により停車している列車に対し、続行列車はその直後にまで進入し得る方式とする計画であった。しかし、保安度の低下を考慮

して、同図(a)に示すごとく、P点と名づける地点制御器を設置して、絶対閉そく方式とした。このため、遅延が増大しないかとの疑問が提起されたが、遅延線を描いた結果、この場合でも $k < 1$ が明らかとなり、遅延の伝播に対し大差ないので、絶対閉そく方式とした。これはP点制御と名づけられた。

(2) 車内信号装置

平常の列車運転では、信号機を確認し得る距離は、列車制御距離まであれば足りる。しかし、列車遅延に対しては、閉そく区間全体にわたって、信号機を確認できることが望ましい。わが国の地形的制約は前者さえも確保するのがむずかしい実状にある。

車内信号装置は、信号機見通し不良の場合に大きな効力を発揮するものといえる。第18図のごとく、3現示での運転を考える。信号現示認識距離 l_0 は列車制御距離 l_c よりも大とすべきであって、閉そく区間長 l と等しくとれば理想的である。しかし一般には、信号現示認識不可能距離 i をもっている。

いま、車内信号装置をもたない列車が、信号機Bに対するブレーキ開始点 Z_B に位置したとする。このとき、信号機Aが故障し、AはR現示を、BはY現示を現示したままになったとする。このため列車は速度を低下してB内に入ることになる。Bの内方へ進入してから、Aの故障が回復し、信号現示が変化しても、 i の中にある間は乗務員は知ることができない。従って、列車は i 区間中制限速度である。このときの遅延線は第19図のBB'GPの形をとり、遅延線 k の値は1に接近し、あるいは、1より大となる場合が生ずる。この傾向は i が大となればなるほど顕著となる。

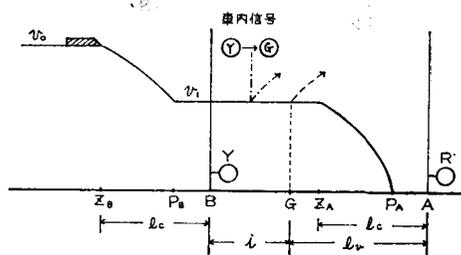
車内信号装置をもっていれば、この場合でも、遅延線は、同図のBGPとなり、上の欠点を補うことができる。

列車保安制御装置は保安上の評価によらねばならないが、上例により、遅延線をもって、その量的評価のための1手段を提供することのできるものとする。

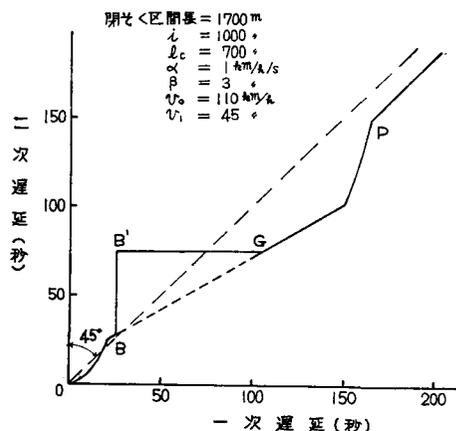
6. 余裕時隔

最小運転時隔に近い時隔で運転される列車群にあっては、運転時間に対して与えられる余裕時間と別に、運転時隔の余裕を定めることが、遅延防止上有効であるとする。運転時隔の不齊は、特に通勤時においては、遅延発生の原因となりやすく、等時隔運転が望ましい。

第18図 車内信号による運転曲線



第19図 車内信号による遅延線



以下は、余裕時隔、ならびに、その関連としての遅延対策について述べたものである。

- (1) 遅延線の値は、遅延伝播の増大か減衰かを決定する。従って、線区の中、最も時隔の短くなる地点においても、遅延線は1より小でなければならない。1より大となるならば、少なくとも1に等しい値まで、余裕時隔を挿入する必要がある。
- (2) 遅延が繰り返し発生すると予想される場合には、余裕時隔の挿入により、(3)式の遅延の大きさが推定されるから、許し得る遅延時間と、列車本数とのかねあいにより、適正な余裕時隔を決定することができる。※
- (3) 通勤時の混雑による繰り返し遅延の発生が予想されても、そのために余裕時隔を挿入することは、列車本数が減少し不利である。保安装置の設置等により、できるだけ運転時隔を短縮することが、輸送力としては有利となる。しかし、この場合でも、遅延線は1より小でなければならない。
- (4) 長期の速度制限等においては、臨時に信号機を建植するなどして、遅延発生防止に努めるべきであろう。前述の荻窪駅の例では、駅中央附近に信号機を建植したならば、その効果は明らかであったと思われる。

7. むすび

列車群の遅延伝播に対し、新たに遅延線を導き、これを基礎として、出生死滅過程による解析を試みたものである。所により、筆者の独断もあると思われるので、ご批判を仰ぎたいと考えます。

終りに、貴重なご教示を賜った、鉄道技研、運転研究室、前室長、狩野英氏、同、現室長、中根之夫技師、同、計画管理研究室、阿部俊一技師の方々に対して、深甚なる謝意を表する次第である。

(参考文献)

- 1) W. Feller : An Introduction to Probability Theory and Its Applications, John Wiley, 1957.
- 2) 石合光雄 : 列車保安制御方式, 鉄道業務研究資料, 13巻, 18号, 昭31.
- 3) 石合光雄 : 列車保安制御方式 (その3), 鉄道技術研究報告 No. 331, 昭38.
- 4) 横山勝義編 : 輸送・運搬におけるOR技法, 培風館, 昭39, 183頁.

※注 これが短小運転時隔線区の線路容量を与えるものである。