

# 列車ダイヤと運転設備の評価

——新幹線列車トラフィック・シミュレータ——

佐藤 章・池田 宏

## はじめに

輸送需要に対して、個々の需要が発生した時点で、ただちにサービスを提供できることが輸送機関として、最も望ましい形態である。いわゆる、マイカーはこのような輸送形態の典型の1つである。鉄道輸送においても、東京や大阪近辺の国電はこの形態に近いサービスを提供している。

しかし、線路に拘束され、したがって、運転者の自由意志によって追越しができない鉄道輸送において、このようなサービスを提供することは輸送資源（設備、車両、乗務員など）の有効活用という観点から、はなはだ不経済なものとなってしまう。このような場合には、したがって、あらかじめ輸送需要を予測し、それに即した運転計画を立て、サービスを行なうようになる。これが鉄道輸送の、大量輸送の大きな特徴である。

あらかじめ決められた運転計画を列車ダイヤと呼ぶ。列車トラフィックの制御は、列車ダイヤどおりに運行させることがその目標となる。したがって、外乱があった場合には、それが発生した時点から何時間後にあらかじめ決められている列車ダイヤにもどったかが、制御を評価する1つの指標となる。外乱の大きさにもよるが、あらかじめ

決められた列車ダイヤへ早急にもどれる見込みがない場合には、列車の運行順序を変えとか、ある列車の運転を休止させるとか、一時的に列車ダイヤを変更する措置がとられる。これを運転整理といい、変更された列車ダイヤを修正列車ダイヤという。

東海道・山陽新幹線は、開業当時1日60本であった列車本数が、現在では275本までに増加し、行先や停車駅が異なる50種類以上もの列車が平均間隔6分という高密度で運転されるようになっていく。しかし、1972年以降、運転事故が増加するとともに、いったん列車の運行が乱れると正常状態に回復するまでに長時間を費やすようになった。

このような問題に対して、運転設備の増強、列車ダイヤの適正化や運転整理方法の改善などを行なうことになるが、複雑な要因が相互に関連しているために、解析的な問題解決がむずかしく、したがって、定性的な議論や評価しか行ない得ない。

新幹線列車トラフィック・シミュレータ（STRATSと略称）は、このような問題解決を定量的に行なうために開発されたもので、具体的には次の目的をもつ。

- (i) 運転設備との関連を含めて、列車ダイヤの動特性を評価する。
- (ii) 運転整理方法の最適化とそのアルゴリズム

さとう あきら、いけだ ひろし

日本国有鉄道 鉄道技術研究所

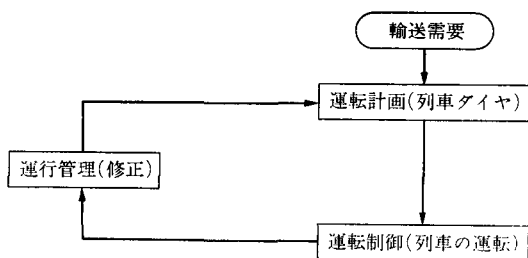


図 1 運転システム

ムを開発する。

- (iii) 運転指令員に対する教育と訓練の場を提供する。

以下に、運転システムを中心とする鉄道輸送の概要、STRATSの機能、およびSTRATSを用いたシミュレーションの応用例について紹介する。応用例については、今後その開業が予定されている東北・上越新幹線について、将来に想定される列車ダイヤと設備との相互関連に対する評価を行なう。

## 1. 鉄道輸送システムの概要

鉄道における生産は、需要に見合った列車を走らせることによって達成される。その中でも重要な役割を果すのは、運転計画、運転制御および運行管理である。これらの相互関係を示すと、図1のようになる。小文と関係するのは、主として運転計画と運行管理である。つまり、鉄道輸送には外乱が発生することを前提にすれば、かならず列車ダイヤの変更が必要であり、したがって、乱れの状態に応じた修正列車ダイヤの作成が必須となる。

乱れたときに、できるだけ迅速に定められた運転計画にもどすためには、弾力性のある列車ダイヤであることが必要となる。そうした意味では、運転整理のしやすい列車ダイヤともいうことができる。

### (1) 運転計画

列車計画は輸送需要と列車運転の供給との調和

を目ざして作成される。需要は3～4年先を予測し、それに対処できるように各種資源の使用計画を決定することになる。資源には、

- (i) 線路や駅の設備……本線はもちろんのこと、駅での着発線、待避線、引上げ線、また、車両基地内の線路も含む。さらに詳細にわたっては、分岐器の位置も関係してくる。
- (ii) 車両……新幹線には、「ひかり」と「こだま」の2種類の編成があり、それぞれが共通して運用することができないことになっている。
- (iii) 乗務員……運転手および車掌。

がある。(i)の設備は原則として24時間使用できると考えてよいが、場合によっては保守作業のために制限を受けることもある。(ii)は故障を未然に防ぐために、定期的な検査・修繕を余儀なくされる。

したがって、車両を運用するときには常にその有効期間を考慮する必要がある。このような制約の典型は乗務員の運用に見ることができる。乗務員の勤務時間、休暇および病休などを考慮した予備の乗務員の人数に対する配慮など、その運用を決めるに当たっては複雑なものとなる。

運転計画は、輸送需要を満たすべく列車の設定を行なうが、上述した資源がどの程度あれば十分か、その有効活用を吟味したうえで立てられることになる。この場合、外乱による修正列車ダイヤを考慮した配慮、つまり、正常状態の場合よりも、若干大目にみた資源の準備が必要になるが、これについては定量的な把握が困難であったために、従来の計画には含まれていなかったきらいがある。

このような条件を事前に評価することが、STRATSの1つの大きな役割である。

### (2) 運行管理

事故その他予期しない外乱によって列車の運行

が乱れた場合に、その状況を的確に把握し、できるだけ迅速に定められた運行計画にもどすべく修正列車ダイヤを作成し、列車の運行管理を行なう必要がある。

修正列車ダイヤは、もとの列車ダイヤに次のような変更を行なうことにより作成される。

- (i) 列車の運転順序……待避変更，順序変更
- (ii) 列車の運転時刻……抑止，臨時停車，時刻変更
- (iii) 列車の休活……運転休止，打切り，臨時列車の運転
- (iv) 列車の場所……着発線変更，引上げ線変更
- (v) 運用……車両運用，乗務員運用

列車ダイヤは、輸送需要に応じ、資源を最も有効に活用して作成されるため、それによって実現される輸送系としての冗長度は、一般にかなり小さいものになっている。したがって、乱れの大きさにも依存するが、輸送系のもつ冗長度でカバーすることができなくなった場合には、まず、上記の(i)，(ii)，(iv)により、それでも安定をとりもどすことが不可能な場合には、輸送を犠牲にする、つまり、運転休止および打切りが必要となる。

このことは、旅客に対するサービス低下をまねくことになる。

修正列車ダイヤの作成をこのようにみれば、その評価は、2つの基準で行なう必要があることがわかる。1つは輸送の犠牲がどれだけかということ、もう1つは、いかに迅速にもとの列車ダイヤに復帰したか、である。

### (3) STRATSの機能

新幹線列車トラフィック・システムの種々の解析を行なうために、STRATSに次の5つの機能をもたせた。

- (a) 列車ダイヤの入力  
想定される運転設備条件，列車ダイヤおよび運

表1 事故例と乱れとの対応

	事故の内容	対応する乱れ
1.	車両点検	(i)
2.	車両故障	(i)
3.	レール折損による線路故障	(i)，(iii)
4.	土砂崩壊による線路閉鎖(不通)	(i)
5.	保安装置故障	(i)，(iii)
6.	送電故障	(i)
7.	架線故障	(i)
8.	集中豪雨による運転規制	(i)，(iii)
9.	怪電話による列車抑止	(i)
10.	地震による列車抑止	(i)，(ii)
11.	降雪による列車遅延	(ii)

転条件(基準運転時間，最小停車時間，最小折返し時間など)のデータをまずもって計算機へ入力する必要がある。列車ダイヤをそのままの形で入力すると，入力データ量が膨大なものとなる。そのため，新幹線の列車ダイヤがパターン化されているという特性を生かした入力方法を採用している。

#### (b) 外乱の発生

列車の運行は事故や災害によって乱される。外乱をシミュレーション的な観点から分類すると，次のような3つのモデル化ができる。

- (i) ある列車の到着や出発が一定時間遅れる。
- (ii) ある駅間での走行時間が増加する。
- (iii) ある駅の着発線や引上げ線が一定時間使えなくなる。

主な外乱に対するモデルとの対応を示すと，表1のようになる。

#### (c) 運転整理(修正列車ダイヤの作成)

STRATSでは，以下の2つの方式を用意し，それぞれ単独で，またはそれらの組合せによって運転整理を行なうことができる。

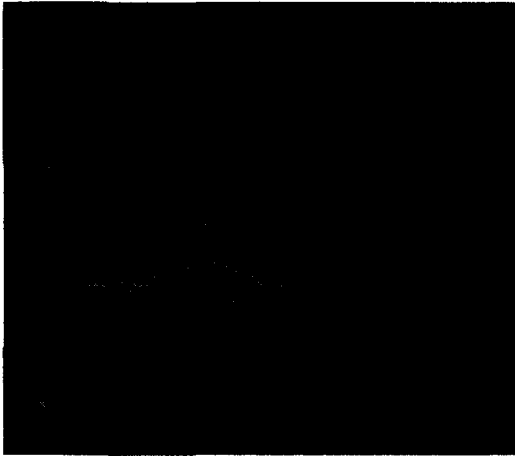


図 2 列車運行状況 (平均遅延)

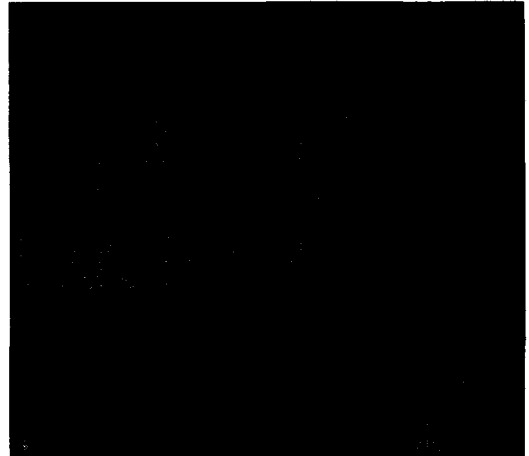


図 3 列車走行軌跡

(i) マン・マシンによる運転整理方式

グラフィック・ディスプレイ装置 (以後、ここではGDと略称する) を入出力端末として、マン・マシン・コミュニケーションにより運転整理を行なう方式である。変更入力項目には、(3)項で述べたものも含めて18種類がある。これには現実に行なわれているもののほとんどが含まれている。

(ii) 自動判断運転整理方式

一定のアルゴリズムにより運転整理を行なう方式である。そのアルゴリズムは、一定条件のもとで、待避発生、待避取消および発順序の変更を自動的に行なうようになっている。この判断はあくまでも2列車間のみについて行なう、いわゆる局所的なものである。

(4) 列車運行の模擬

これはシミュレーション・モデルにしたがって、列車の運行を模擬させる機能である。個々の列車は、列車ダイヤのもとに走ることになるが、正常時 (乱れていないとき) には列車ダイヤどおり、異常時 (乱れているとき) には、修正列車ダイヤをもとに、基準運転時間、最小停車時間および最小折り返し時間により回復運転を行なうことになる。

シミュレーションはオンラインで行なわれてお

り、図2に示すように、列車の運行状況 (走行中の列車当りの平均遅れ時間) がGDをとおして観察することができる。

(5) 編集出力

シミュレーション実行のあと、分析に必要な種々のデータを編集して出力する機能である。これには、シミュレーション結果そのままの形で出力するもの、と統計的に処理してから出力するものの2種類になる。前者の例を示すと図3のようになる。これは列車の走行軌跡で実績列車ダイヤと呼ばれているものである。

3. シミュレーションによる解析例

東海道・山陽新幹線とは異なり、東北・上越新幹線は大宮駅で線区の分岐の合流がある。すなわち、上野—大宮間は両線区の列車が1本の線路を共用する。ダイヤ乱れが一方の線区に発生した場合、合流区間およびもう一方の線区の運行状況がどうなるかは、これまでの経験では予測できない。

そこで、STRATSを利用して開業後の安定輸送の方策を検討するために列車ダイヤとその運転設備の評価を行なった。ここでは、上野駅および大宮駅における着発線に関する検討例を紹介する。

表 2 シミュレーション・ケースの内容と結果

ケース	最小折返時分 $t_u$ (分)	平面交差支障 時分 $t_c$ (分)	収束比
1	22	3.75	6.39
2	18	3.75	2.69
3	22	3.25	5.31

これらは列車の運行が乱れたとき、各駅での着発線の配線がいかにあれば乱れの波及を最小限にとどめられるかを検討するためのシミュレーションである。

(1) 上野駅に関する検討例

開業時のダイヤの原案では、東北新幹線が「ひかり」「こだま」とも1時間1本が基本で、1日の運転本数は上下計約60本であり、上越新幹線も「ひかり」「こだま」とも1時間1本で、運転本数は上下計約40本となっている。ここでは輸送需要が増加して、東北、上越新幹線ともに「ひかり」「こだま」がそれぞれ1時間に2本となった場合を想定した。

この場合、上野駅がホーム2面で着発線が4線しかなく、線路容量の列車ダイヤに対する余裕が少ない。いったんダイヤ乱れが生じると収束するのに長時間を要する。上野駅は新幹線で初めての地下駅で在来線の地平ホームの地下に設けられ、これ以上線数を増やすことはむずかしい。

一般的には着発線容量を制約する要素に、最小

折返時分（上り列車が到着して、その車両が下り列車となって出発できるまでの最小時分）と平面交差支障時分（下り列車が出発してから、同じ分岐器を使用する上り列車が到着できるまでの時分）がある。

これらの制約要素にもとづく1時間当りの折返し可能列車本数は、次の式から得られる。

$$n < \frac{4 \text{本} \times 60 \text{分}}{t_u + t_c}$$

$n$  : 折返し可能列車本数

$t_u$  : 最小折返時分 (分)

$t_c$  : 平面交差支障時分 (分)

$n$ を増加させるためには、 $t_u$ または $t_c$ を減少させなければならない。

最小折返時分は、乗客の降車乗車時間、乗務員の乗継時間、車内整備時間、食堂車の積込み時間などによって決められ、現行新幹線の東京駅では $t_u=22$ となっている。しかし列車長の短縮、車内整備を短縮させる設備の導入などによって短くすることも考えられる。

また平面交差支障時分は車両性能、分岐器の位置などによって決められ、東京駅では $t_c=3.75$ となっているが、車両性能の改善、分岐器の位置の変更によって短くすることができる。 $t_u=18$ または $t_c=3.75$ になったとして表2に示す3ケースについてシミュレートし、ダイヤ乱れの収束特性を調べた。乱れは、東北線上り新白河で車両故障による60分遅延を想定した。

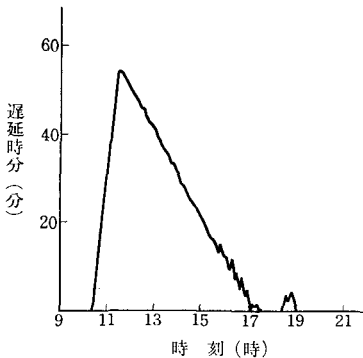


図 4 上野駅到着遅延グラフ  
( $t_u=22, t_c=3.45$ )

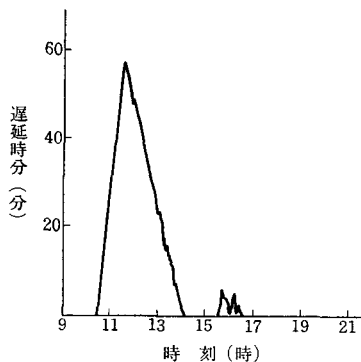


図 5 上野駅到着遅延グラフ  
( $t_u=18, t_c=3.75$ )

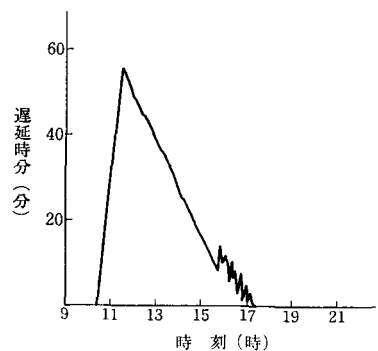


図 6 上野駅到着遅延グラフ  
( $t_u=22, t_c=3.25$ )

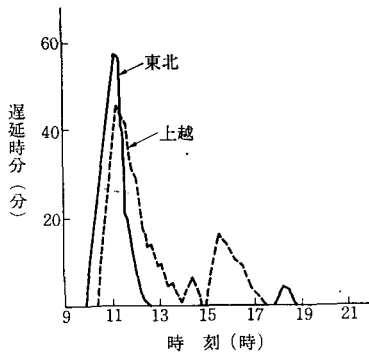


図 7 大宮駅上り到着遅延グラフ

それぞれのシミュレーション結果を図4, 図5, 図6に示した。x軸に時刻, y軸に上野駅の到着遅延時分をとった上野駅到着遅延グラフである。図4で18時30分頃, 図5で15時30分頃に再び遅延が現われているのは, 遅れて上野駅を出発した列車が新潟駅で折り返し, 遅れをそのまま上野駅にもち越したもので, これを2次遅延と呼ぶ。図6では16時から17時の間で2次遅延が重なっている。

ここで1時間の到着遅れを収束するために要する時間を収束比として, それぞれのケースについて求め表1に併せて記した。ただし2次遅延を除いてある。

この結果より特に最小折返時分がダイヤ乱れの収束に大きく影響するが分岐器の位置をえることによっても効果のあることがわかる。

## (2) 大宮駅に関する検討

大宮駅はホームが3面で着発線が6線ある。上越線の上下で1線ずつ, 東北線の上下で2線ずつを使用する計画となっている(図8-a)。この設備で前記のケース1でダイヤ乱れも同じにしてシミュレーションした結果を示した。これより, 上越線のほうが大宮駅に到着できずに待たされることが多くなり, 遅延が大きくなっている。上越線も上りが2線あると, 東北線と同じ条件となり早く収束することが期待できる。よって乱れを迅速

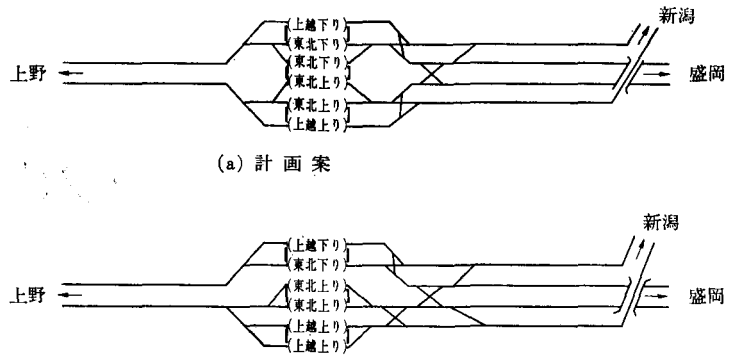


図 8 大宮駅の配線図

に収束させるためには, 図8-bに示す線路配線にし, 上り線を4線, 下り線を2線とする使用法のほうが効果的であることがわかる。なお, 下り線が2線で不足しないかという問題があるが, 他の中間駅と同様に1線で6本/時の列車が着発しても, まだ十分に余裕があり乱れ収束に支障はないこともわかる。

## おわりに

STRATSは, 鉄道技術研究所にあるIBM—PDP複合計算機システムにインプリメントされている。マン・マシン・インタフェイスにはE&Sのグラフィック・ディスプレイを用いている。

小文では, 鉄道輸送システムに対する概説を行ない, STRATSの機能および東北・上越新幹線に関する検討例を紹介した。その他, 所期の目的のために, STRATSは, 効果的に使われている。