

新幹線運転整理シミュレーション

辻野 照久*

1. まえがき

運輸業においては、商品は「輸送力」であり、商品の品質は「高速性」「大量性」「安全性」「経済性」「定時性」などの尺度で評価される。国鉄の新幹線の場合は、長距離の旅客輸送の分野で高品質の商品を生産するトータルシステムを形成しており、国鉄のドル箱であるだけでなく、社会全体の諸活動に大きな影響を及ぼしてきた。ところが、新幹線も開業後十年余りを経て、設備が老朽化してきたうえ、年々増大する輸送需要に応じて列車を増発してきたため、故障等の発生する頻度が高くなると同時に、一旦故障等の発生した場合に列車ダイヤの乱れを収束させるのに長時間を要するようになってしまった。また安全の確保に特に注意を払うこともあって、結果として「高速性」「定時性」などが犠牲となり、利用者に多大な迷惑をかけることがしばしばあった。

ところで、列車ダイヤの乱れをあとから振り返ってみると、二次的な乱れが見られ、対応策によっては遅延時分を大幅に縮小できたはずだと思われる、改善の余地があることがわかる。そこで、列車ダイヤ乱れが発生することはやむをえないという前提で、もし乱れが発生した場合にどうすれば利用者を与える迷惑を最小限に食い止めることができるかをシミュレーションによって検討してみることにした。これが標題の“運転整理シミュレーション”である。

* 日本国有鉄道 東京システム開発工務局システム開発室主席

2. 新幹線運営の現状

新幹線を円滑に運営するためには、限られた資源（設備、車両、乗務員等）を有効に活用し、一切の外乱がないことが必要である。しかしながら、線区の延長が約1,070キロ、列車本数が260本（営業列車のみ）にも達すると、さまざまな問題が起こってきた。現在、新幹線運営上の問題点のうち、本論に関係の深いものを列挙する。

(1) 設備に関して

- ア) 列車発着回数の最も多い東京駅において、着発線が5線しかなく、ほとんど余裕がない。
- イ) 東京駅～東京第1運転所（品川車両基地）間に回送線がなく、営業列車と回送列車が輻奏する。
- ウ) 熱海駅に待避線がないため、続行時隔、列車順序が制約される。
- エ) 東海道線の建設時の規格が山陽線に比べて低く、弱点箇所が多数ある。

(2) 運用に関して

- ア) 営業用電車が150編成ほどあり、東京・大阪・博多の車両基地での定期検査に余裕がほとんどない。
- イ) 乗務員の運用にも余裕があまりない。長距離の乗務のため、行路の変更が困難である。
- ウ) 運転整理の難しい列車ダイヤとなっている。

(3) 気象条件に関して

- ア) 地震多発地帯を通過している。（東京～名古屋）
- イ) 冬期の積雪・降雪量の多い地域を經由している。（名古屋～京都、三原～徳山など）
- ウ) 強風・豪雨などが局地的に発生する。

(4) 人災に関して

表・1 昭和50年12月の乱れ発生状況

発生日	発時刻	原因	区間	最大遅延時分	運休本数
4	16:31	保安装置故障	新大阪	20	0
6	17:50	車両故障	京都～大阪(運)	129	0
8	21:11	"	名古屋～羽島	59	0
9	22:50	線路故障	京都～大阪(運)	不明	0
11	7:10	"	名古屋～羽島	19	0
13	10:18	車両故障	東京(運)～新横浜	30	0
15	9:54	地震	新横浜～静岡	189	24
16	7:57	線路故障	京都～大阪(運)	90	0
17	6:00	降雪	名古屋～姫路	不明	0
	16:54	線路故障	熱海～三島	"	
18	21:22	怪電話	大阪(運)	96	0
19	21:52	線路故障	米原～京都	不明	0
20	9:48	車両故障	熱海～小田原	"	24
25	7:39	線路故障	米原～京都	13	0
	16:01	死傷	岡山	20	
26	17:54	列車支障	新大阪	25	0
	21:03	車両故障	京都～米原	20	
27	9:41	"	東京	58	0
	19:30	列車支障	三島～静岡	30	
29	7:05	線路故障	京都～米原	10	0

注) 10分以下の乱れは除く。

爆破予告, タコ上げ, 自殺等, 故意または過失の人災がしばしば発生する。

3. 乱れの発生と収束

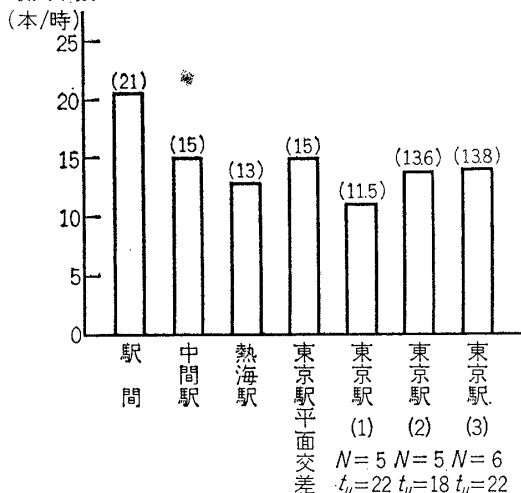
3.1 乱れ発生の実情

新幹線において, いかに日常的にさまざまなダイヤ乱れが発生しているかを, 昭和50年12月の1カ月間の乱れ発生状況を例として表・1に示す。

この表を見ればわかるとおり, 1カ月の半分以上にあたる16日に乱れが発生しており, 件数は20件にもなっている。なかでも12月15日の地震による遅延は最大3時間にもなっているが, このような超大型の乱れは3~6カ月に1回くらいは発生する。

年間を通じてみると車両故障が最も多いが, 編成別,

最大本数



図・1 地点ごとの最大列車本数

部位別, 原因別にみて全く同じケースということではなく, 日常の保守・点検を規則通りに行ったりえでの偶発故障と考えられる。他の故障についても大同小異で, 予期しえないものである。天災・人災についてはもちろん避けえない。このような実情から, 予防保全と同時に, 乱れ発生後の対策を確立することが緊急に必要なだったのである。

3.2 乱れ収束のネック

「乱れ収束」とは, 一地点に注目して, 抑止解除後事故列車から徐々に遅延が減少し, 全く乱れの影響を受けない定時運転の列車が出現するまでの過程をさす。ある区間において, 1時間当たりの計画列車本数が N 本であり, その区間で最大 n 本まで運転可能であるとすると, 次式により「乱れ回復率」が求められる。

$$\theta_T = n/N - 1 \tag{1}$$

乱れ回復率の逆数 $1/\theta$ は, 1時間の遅延に対して何時間で乱れが収束するかを表わす。

注目する地点が折り返し駅の場合も同様であるが, 最大本数は, その駅の着発線数 L , 最小折り返し時分 t_u , 最小入出時隔 t_c を用いて

$$n = 60L / (t_u + t_c) \tag{2}$$

と表わすことができるので, 乱れ回復率 θ_T は

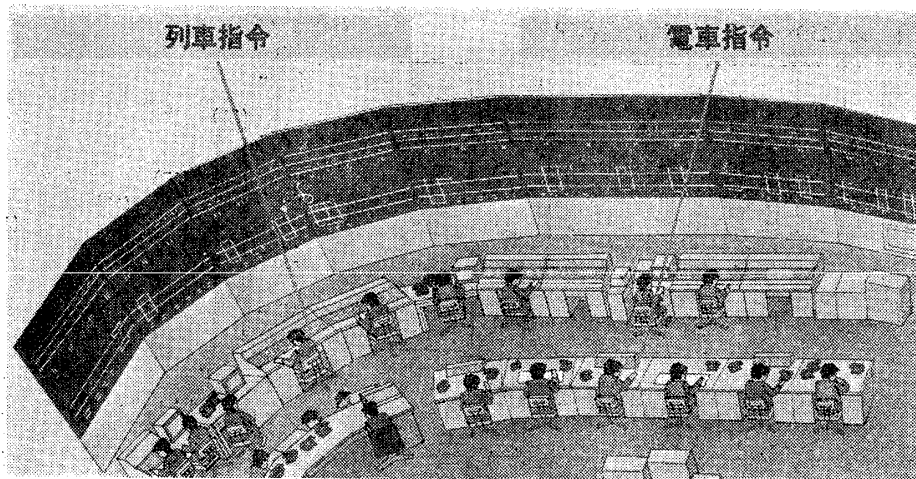
$$\theta_T = 60L / N(t_u + t_c) - 1 \tag{3}$$

で求められる。

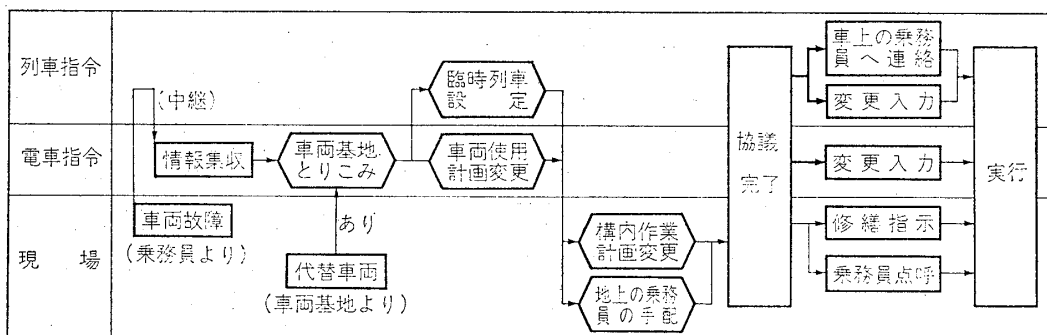
たとえば, 東京駅では着発線が5線あって, 最大の計画本数は10本であり, 最小折り返し時分は22分, 最小入出時隔は4分とすると

$$\theta_T = 60 \times 5 / 10 \times (22 + 4) - 1 = 0.154 \tag{4}$$

$$1/\theta_T = 6.5 \tag{5}$$



図・2 運転指令室の概念図
(新幹線総局発行のパンフレットより)



図・3 車両故障発生時の運転整理業務の流れ

となり、1時間の遅延をなくすのに6時間半もかかることになる。なお駅中間の乱れ回復率は0.5~1.0である。

図・1には、注目する区間ごとの最大列車本数を示すが、中間に熱海駅をはさむ小田原~三島間が1つのネックであり、東京駅が現状のままでは最大のネックとなっている。少なくとも小田原~三島間以上の折り返し能力を持たせる必要があり、その方策は

①折り返し時分を短縮する(22分→18分とする)

②着発線数を増加させる(5線→6線とする)

のいずれかであるが、折り返し時分については増大こそすれ、短縮の見通しはほとんどない。また着発線が増加しても運用上よくないダイヤを組めばその効果が発揮されず、巨費を投じて設備改良した意味がなくなる。

いずれにしても、東京駅の折り返しをどう円滑にさばくかが、新幹線全体の輸送品質を高レベルに保つ最大の眼目である。

4. 輸送管理の現状

4.1 指令体制と運転整理

新幹線は東京駅構内にある総合指令所から全線・全列車の運転をコントロールしており、高度の輸送管理を行

いうる体制をとっている。指令所内には運転・営業・施設・電力・信号・通信・コムトラックの各指令室があり、運転指令室は列車指令と電車指令に分かれている。運転指令室の概念的な様子を図・2に示す。

(1) 列車指令の役割

列車指令員は主に列車運転の監視や制御を行う。

ア) 当日の列車ダイヤと運転状況の照合

イ) 列車ダイヤの変更の入力

ウ) 車上の乗務員への指令伝達・情報伝達

(2) 電車指令の役割

電車指令員は主に車両運用の管理や技術指導を行う。

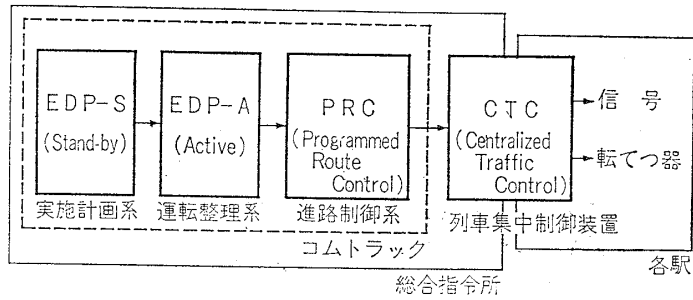
ア) 車両の定期検査(交番検査, 台車検査, 全般検査) 施行の確保

イ) 車両使用予定の作成と現場への伝達

ウ) 車両故障発生時の情報収集および乗務員に対する技術指導

(3) 列車指令, 電車指令, 現場間の協議

列車指令と電車指令はそれぞれ単独で業務を行うだけでなく、現場も含めて一体となって1つの意志を決定し実行することがある。たとえば、ある列車が車両故障で遅延したとして、終着駅で車両基地へ取り込むため折り返し回送列車とし、その列車の本来の折り返し列車は別



図・4 新幹線運転管理システムの構成

の車両を車両基地から取り出して充当するという、一連の運転整理を行った場合、三者は図・3に示すように協議し、業務を分担して実行するのである。

実行の最終段階で指令室からアウトプットとして現場に出されるのは、「どの信号を」「どの列車のために」「何時何分に」進行現示させるという進路制御の形である。この部分をコンピュータによって補助するのがコムトラックである。

4.2 新幹線運転管理システム

新幹線運転管理システム（コムトラック）は図・4に示すような構成で新幹線全線の進路制御を自動的に行っている。異常時には情報処理用コンピュータ（EDP）により、将来の運転状況を最大12時間幅まで予測する機能を利用して、列車ダイヤの変化をグラフィックディスプレイに表示させ、運転整理の方針の検討やその結果のシミュレーションを行うことができるようになっている。

5. 運転整理シミュレーションの実施

5.1 シミュレーション手法開発の背景

昭和49年度を境に、新幹線の列車遅延は急激に増大し、

払い戻し額が多額にのぼるばかりでなく、利用者に及ぼす迷惑も深刻な状況になった。特に、端末駅における列車の折り返しが円滑にいかないための遅延の拡大については、できるだけ少なくする努力を払う責務がある。この対策として、列車ダイヤ自体の有する乱れ回復特性の研究や運転整理手法の検討を行うことになった。その手法としてコンピュータを利用してのシミュレーションが最も確実に迅速に結果が得られるものと考えられ、新幹線運転管理システムのEDP系予備機を使用することになった。

5.2 シミュレーションの方法

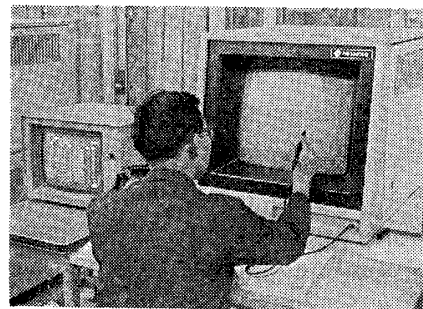
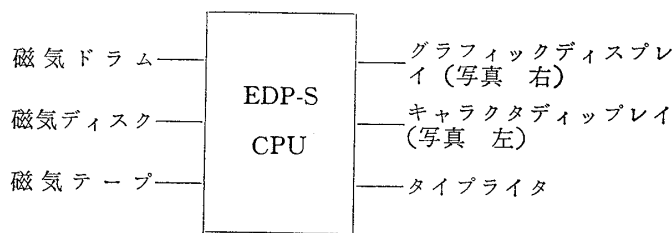
シミュレーションを実施するため図・5に示すように待機予備系CPUに周辺機器を接続し、運転整理関係のデバッグ用のプログラムをロードして、実際の指令業務とほとんど同じマン・マシン・オペレーションを行えるようにした。次に、シミュレーションの手順として、図・6に示すように供試ダイヤを作成し、種々の乱れを与え、変更入力（運転整理の具体的な内容——たとえば運休とか順序変更など）を繰り返し行うことにした。なお実際のシミュレーションでは供試ダイヤを10種類以上用意し、乱れ設定は区間、発生時刻、第1次原因による遅延時分を種々組み合わせさせた。

5.3 シミュレーションの結果の一例

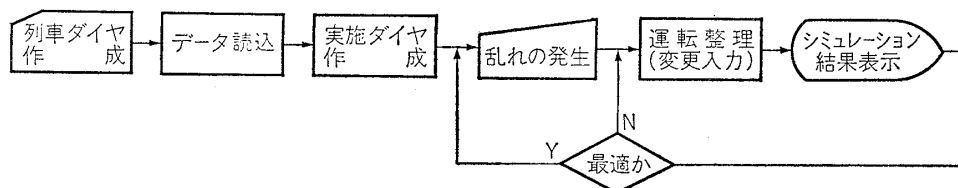
運転整理シミュレーションによって得られた成果のうち興味深いものをいくつかあげてみる。

(1) 乱れの発散

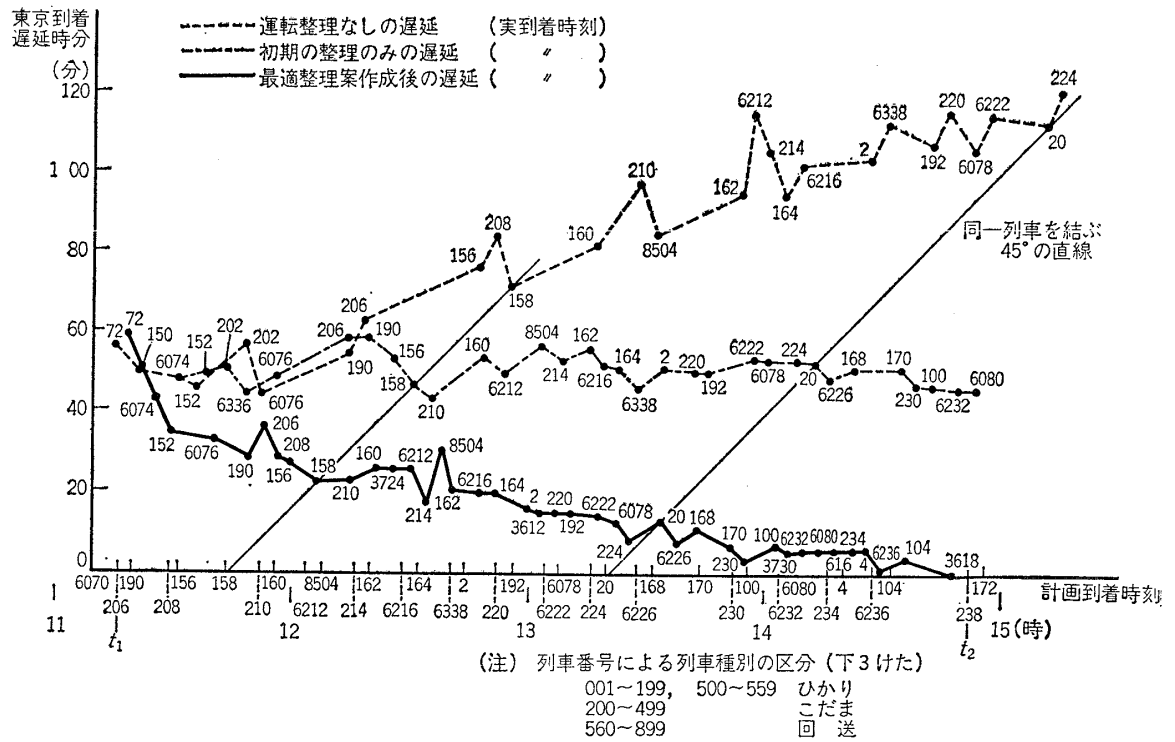
昭和50年8月16日(土)のお盆輸送ピーク時のダイヤにさらに上下30本の列車をそり入し、1時間当たり「ひかり」5本、「こだま」4本が東京駅に発着するという最高



図・5 シミュレーション用機器構成



図・6 シミュレーション手順



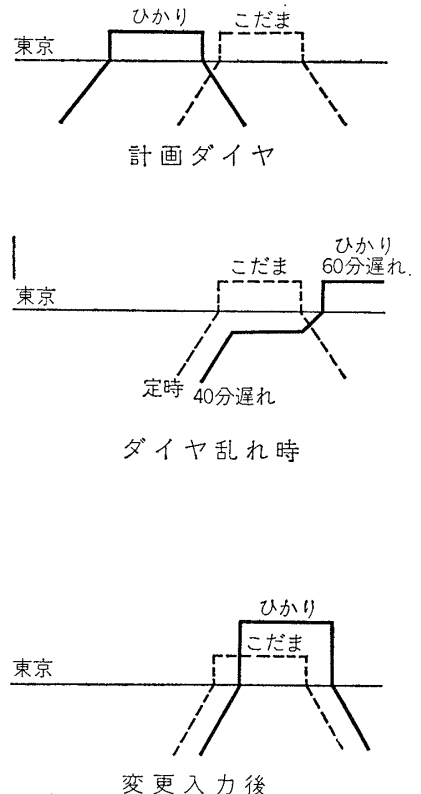
図・7 乱れの発散と収束の様子

密度に近い列車ダイヤを作成し、これに対して静岡～浜松間で上り列車が60分抑止されるという乱れを与えた。その結果、図・7にみられるように、運転整理なしの状態では東京駅の到着遅延が雪ダルマ式に増大し、ごく簡単な運転整理では遅延が横バイとなり、何回かの試行錯誤の結果得られた最適の運転整理でようやく3時間40分後に乱れが収束することがわかった。ここで重要なことは、最初の結果は人間がいなくてコンピュータのみで制御を行った場合を示していることで、コンピュータに与えられた判断能力を積み重ねると乱れが発散するわけであるから、コンピュータの判断能力を強化するか、人間がうまく使いこなすか、何らかの方法で乱れが収束するように努力しなければならないということである。

もう1つは、3時間40分という乱れ収束時間は、東京駅の折り返し能力からみて限界であるということである。これを改善するため、東京駅の着発線を現在の5線から6線に増加することが強く望まれており、横浜市内の貨物新線開業→横須賀線の地下ホーム移行→地上ホームの撤去という手順を踏んで新幹線の3面6線化が実現するのも間近と思われる。

(2) 着発線変更の連続

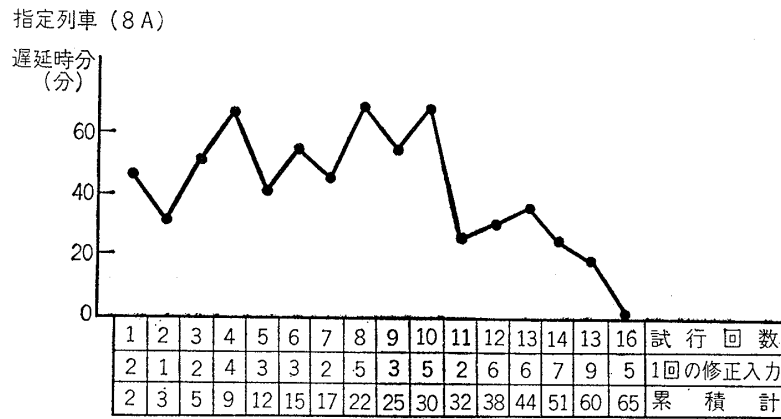
前項と同じダイヤで乱れ設定を60分から40分へと短縮したところ、信じられない結果が出た。第1原因である静岡～浜松間の抑止の時間に関係なく、東京駅の遅延状況が全く同じなのである。第1原因列車はこれまでの常



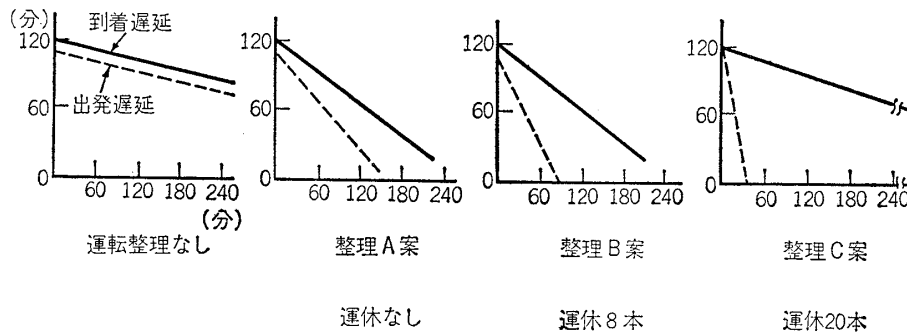
図・8 着発線の競合と運転整理

識から言えば、前途に列車がないのであるから若干の回復運転によって遅延が数分減るはずであり、遅延が20分も増えるのは納得できなかった。

この原因は図・8に示すように、東京駅での着発線の



図・9 着発線変更の連続と遅延の推移の関係



図・10 運転整理の方針とシミュレーション結果の関係

競合である。新幹線によく乗車される方は次のような経験をお持ちではないだろうか。「東京駅の手前、新橋か有楽町あたりで10分も20分も停車したままだ。車掌が東京駅のホームが満線のため、信号待ちですと言う。ところが東京駅についてみると、他のホームには1本も列車がない。これがどうして満線なんだ。」たとえ他の4線が空線であっても、コンピュータは計画通りの着発線を守るために、たった1線に入っている列車によって満線と同じことになるのである。

ところで、それでは空線に到着するように変更すればどうなるか。適当に空線を選んで着発線変更の入力をし、その条件を守ったシミュレーションを行う。すると今度は別のところで競合が起こって、全体の乱れ収束は大差がない。次々と着発線変更を行ってみて、そのたびにある列車の到着遅延を記録した結果を図・9に示す。16回のシミュレーションの所要時間は約2時間であり、実際の運転に追いつかない可能性がある。さらに、このように着発線変更が連続した場合、利用者に対する案内、乗務員に対する指示など一つでも間違えば混乱に拍車をかけることになる。

(3) 運休本数の選び方

1つの乱れ発生に対していくつかの運転整理のやり方が考えられる場合に、シミュレーションによってどの方法が最も良いかを調べることができる。昭和51年12月3日(金)のダイヤをそのまま使用し、14時に東京～静岡間

で地震が発生したという想定で、2時間の遅延を与えてみた。変更入力として、運休なしで着発線変更を主体に東京駅の運転整理を行うA案、運休8本でそれに伴う折り返し変更を行うB案、運休20本で折り返し変更を行うC案と3つの案を作成し、それぞれシミュレーションを行った。その結果得られた東京駅着発遅延の概況を図・10に示す。運転整理を行わない場合に比べて、A案およびB案では到着遅延が大幅に減少しており、B案の発遅延はA案のそれよりも少なくなっている。ところが、C案については、発遅延がきわめて小さいのに比べて到着遅延が大きく、なかなか乱れが収束しない。そしてある時間帯に突然遅延がなくなる。このように運休本数が多くなると、従来は乱れが早く収束すると思われてきたが、実際には折り返し計画との関係で限界値あるいは最適値があり、その付近の本数を選んだ時に最もよい運転整理ができる。

なお、A案とB案の比較のためには、運休により失われる座席数または列車回数(フリクエンス)の減少が利用者に及ぼす迷惑と、列車の遅延(この場合は特に東京駅の発遅延)による迷惑という次元の異なる評価基準の重みづけがなされなければならない。新幹線は季節波動・曜日波動が大きいので、その日によって運休してはならない日(大量性の確保)と適正な運休の許される日(定時性、高速性の確保)とがあり、重みづけも異なってくる。

(p.15へつづく)

(a)については、すべての方法が薬効の差の有意性を示し、特に方法1, 2では高度に有意である。

(b)については、どの方法によっても有意性は示されない。特に方法1, 2において分子の平均平方がF検定のそれよりも小さくなるから、たとえ眠りの深さのパターンの違いがあったとしても、ある人がある人より深い眠りにあるというような方向性は否定される。

9. 結 論

本論文においては、2因子交互作用の検定の際に加法性の帰無仮説 H_0 を H とか K のような方向性のある対立仮説に対して検定することの必要性を論じた。さらにそのような場合には、誤差の独立性が仮定できない場合がよくあることを指摘した。 H および K の検定で F 検定にかわる方法として方法1, 2および方法3, 4を提案し、特に H に対する方法1, 2と F 検定の検出力の比較を行った。検出力についてはさらに検討を必要とするが、とりあえずの結論は、 H の検定としては一般に方法1がすぐれており、 μ_{ij} が j に関して線形なトレンドを示すような、より限定された仮説の場合には方法2が非常に高

い検出力を示すということである。これらのことは8節の数値例によくあらわれている。

謝 辞

本論文中の仮説 H, K を考える動機を与えて下さった奥野忠一先生ならびに有益な議論をしていただいた竹内啓先生に深甚の謝意を表します。また、8節の数値例を提供していただいた高橋行雄氏(日本ロシュ)にも謝意を表したいと思います。

参 考 文 献

- [1] Bartholomew, D. J. (1961): "A test of homogeneity of means under restricted alternatives", *Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B* 23, 239-281.
- [2] 広津千尋(1976): 「分散分析」, 教育出版.
- [3] 広津千尋(1977): 「近似とその応用」, 「応用統計学」, Vol. 6, No. 1 に掲載予定.
- [4] Mandel, J. (1971): "Non-additivity in two-way analysis of variance", *Journal of the American Statistical Association*, 66, 878-888.
- [5] 田口玄一(1966): 「統計解析」, 丸善.

(p. 41よりつづく)

6. 今後の課題

シミュレーションにより今後どのような施策を行ってあげばよいか、いくつかの課題が与えられたと思う。

(1) 輸送路のネックの解消

ネックとなっている箇所を1つずつ改善し、徐々にネックの最大列車本数を増加させていくことが必要である。当面は東京駅の3面6線化が重要課題である。

(2) コムトラックの改良

コムトラックの判断機能の強化は指令体制に大きな効果をもたらす。乱れ発散の防止、着発線選択機能など付加すべきソフトウェアの開発を進めている。

(3) 指令員の能力向上

コムトラックを取り扱う指令員においても、その機能を使いこなすノウハウを蓄積する必要がある。そのため訓練等を行ったり、マニュアルを整備することが必要である。

(4) 乱れに強い列車ダイヤの採用

現行のダイヤは平常時には最適なダイヤであるが、異常時には最悪のダイヤとなっている。その理由は「ひかり」と「こだま」が同一着発線を使用しているためで、

それぞれ着発線を分離してやるとよい。これは3面6線化によって改善されよう。現時点の設備においても改善することはできるが、残念ながらダイヤ改正の困難さから容易には実現しそうもない。

筆者の個人的見解としては、「ひかり」3線、「こだま」2線を専用に使わせるダイヤが最も乱れに強く、大抵の乱れ発生に対処できるものと思っている。

7. あとがき

新幹線運転整理シミュレーションはまだあまり多くの人に知られておらず、はたして品質管理の分野になじむのかどうか分からないままに本文を書いたが、国鉄の運転業務における最も先進的な問題点に対して最も新しい技術を利用して、わずかながらも実際の場に役立つ形で成果が得られたということで、1つの体験談として御笑覧いただきたい。筆者は現在東北・上越新幹線対応コムトラックの開発に従事しているが、東海道・山陽新幹線の経験を踏まえて、少しでも輸送の品質管理に役立つ機能を開発したいと思っている。

なお本テーマは、第7回日科技連信頼性・安全性シンポジウムで発表させていただいたものと同じである。当日の討論を含めて若干内容を補足した。