

JR鉄道における 列車ダイヤのスケジューリングとシステム化

細井 敏弘

1. はじめに

輸送業は、輸送力という商品売って輸送量という売り上げを得る業といえる。一般に企業が生産を行なう場合は、綿密な市場調査を行ない需要動向を見きわめて生産するが、生産と販売の間にはギャップがあり、それが流通過程において生産品のストックとなる。したがって、在庫管理を行ないながら生産計画を調整し、適正な生産規模を維持することが可能である。

しかし、輸送サービス業においては、生産と販売は同時に行なわれ、生産のストックはできない。したがって、一般の製造業以上に綿密な市場調査を行ない輸送需要を予測し、それに適合した輸送力を生産する必要がある。余剰輸送力の生産はコストの増大を生じ、不足した輸送力の供給は過大な乗車効率や積み残しあるいは滞貨現象を生じ、社会活動に影響を与えるとともに、利用者が他の輸送機関へ転移することになる。

また、利用者は、公表されている列車時刻表にもとづいてその輸送機関を利用しているため輸送力の供給が多過ぎたからといってむやみに輸送計画を変更し、列車を運休して輸送力を削減する（現実には不可能であるが）ことは、利用者の信頼を失うこ

とになる。

一方、列車ダイヤは、輸送計画を具体化した生産のスケジュールであり、生産に必要な資源（線路・信号などの設備、車両および乗務員・駅員などの要員）を最も効率的に使用するものでなければならぬ。

このように、輸送計画を需要に適合しかつ最小のコストとなるようスケジューリングすることは輸送業にとって経営上最も重要な条件となる。輸送計画作業の流れを図1に示す。

2. 鉄道の特徴

鉄道輸送は、大量・高速輸送と経済性および安全性、定時性に優れた交通機関となっているが、図1における列車計画に関連する鉄道のもつ特徴について説明する。

(1) スケジューリングの必要性

鉄道は、その通路が1次元的な軌道によって決

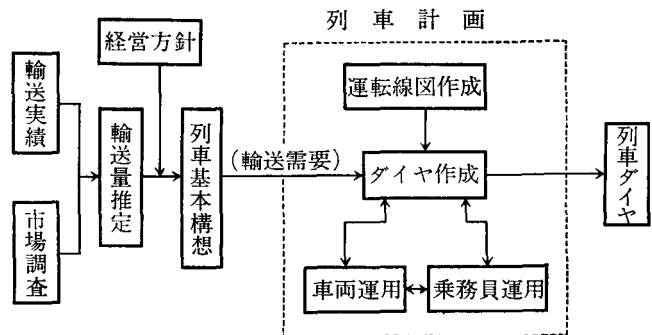


図1 輸送計画作業の流れ

ほそい としひろ 財鉄道総合技術研究所

〒185 国分寺市光町2-8-38

められており、輸送に供する車両の移動がそれによって拘束され、行路および通路の選択が自由にならない。路線バスや定期航路の船舶や航空機も行路を自由に選択できない点は同じであるが、一般に行路は複数本の通路をもち、操縦者の意志によって通路を変更し追い越し等が可能であることが鉄道と大きく異なる点である。

また、鉄道は、その通路を運行者が専有しており、一般の者が自由に軌道上を運転することはできない。

鉄道は、列車どうしの追い越し、待ち合わせする時刻と場所、単線の場合には行き違いをする時刻と場所等を列車の運転にともない、あらかじめ計画しておかなければ、ひとつの列車の運転が他の列車の運転にも影響をおよぼし、輸送計画で意図したような輸送サービスの提供ができなくなる。鉄道においては、列車の運転は運転士の意志で自由に運転することはみとめられておらず、定められた運行スケジュールにしたがい、駅あるいはCTC（列車集中制御）センターから信号を介してのコントロールのもとに運転が行なわれている。列車運行のスケジュールすなわち列車ダイヤにしたがってすべての列車が計画的に運転されている。

また、当然のことながら、鉄道の車両は列車として運転されている時以外でもたとえば、修繕、清掃、車庫に留置中など何時の時点においても線路上になければならず、車両の移動、留置等が常にある区間の線路を占有することが可能なように計画をたてなければならない。

列車計画を立てることはすなわち、線路と車両を中心とした使用計画を立てることである。

(2) 閉そく

鉄道は、自動車などの他交通機関と異なり、鉄のレールの上を鉄の車輪で走る。レールと車輪との間の摩擦係数は低く、実測値では摩擦係数 $\mu = 0.2 \sim 0.3$ 位である。また列車は、路面電車のような軽量、低速のものを除けば、重量が大きく高速

で走行するためブレーキ距離が長く、600m以内で止まれればよいことになっている。したがって運転士は目視で前方の列車を認識しながら安全に運転することは不可能である。このため前方の列車に衝突しないよう信号機を制御して、列車の後方一定区間には他の列車を入れないことを原則としている。単線の場合には、駅間に1列車しか入れない方法をとる線もある。この一定区間を閉鎖し他の列車を入れないようにすることを「閉そく」(block)と呼んでいる。

(3) 進路制御

軌道によって拘束され、運転する列車どうしが追い越し、待避、行き違いをすることを可能にするためには、あらかじめ定められたスケジュールにしたがい、軌道を分岐しなければならない。すなわち分岐器により閉そくの異なる区間へ列車の進路を振り分ける制御が必要になる。列車の進路を分岐する箇所は駅（信号所、操車場を含む。鉄道ではこれらを停車場と言う）であり、駅以外のところには列車を分岐する装置はない。この分岐装置により進路を取り扱うのは駅であり、列車ダイヤにしたがって操作される。なお、最近では1カ所に集めて進路制御を行なうCTC装置が多く導入されている。

3. 列車ダイヤ

列車ダイヤは、前項で述べた鉄道の特徴にもとづく各種条件を加味してスケジューリングを行ない作成される。以下列車ダイヤの設定方法について述べる。

(1) 列車ダイヤ図

列車ダイヤ（またはダイヤ）という言葉は、一般に列車の時刻あるいは運転計画の意味で使われることが多いが、列車ダイヤ (Train Diagram) とは列車運行図表のことである(図2)。縦軸に距離(駅)を横軸に時間をとり、時間の推移に伴う列車の軌跡を線図にしたものである。列車の設定(スケジューリング)に使われるダイヤ図は、2分

目ダイヤ（東京や大阪などの通勤電車区間は列車本数が多く1分目ダイヤを使っている）といい、時間軸の1目盛りが2分できているダイヤ図である。2分目ダイヤにおいて重要なのは、時刻表示記号である。列車線を書く場合には、見やすくするため、数駅間にわたって直線で引かれるので列車線と時刻線の交点は、正確な時刻を表わしているわけではない。駅における列車の到着、出発時刻をこの時刻表示記号を用いて15秒（10秒の場合もある）単位で表示することができる。これによって交点を読み取らなくても正確な駅の時刻がわかる。時刻表示記号と2分目ダイヤの表示例を図3に示す。

列車運転時刻表は、列車ダイヤ図から各駅の時刻を読み取って作成される。駅頭や市販の時刻表は、秒の部分を持ち捨てたものである。

(2) 駅間運転時間

列車ダイヤを作成するためには、その列車が各駅間ごとに運転に要する時間を求めなければならない。

列車の運転は、運転方程式、

$$Wdv/dt = T(v) - R(v) + G(s) - B$$

ただし、 W ：列車重量、 v ：速度、 t ：時間、

T ：引張力、 R ：抵抗、 G ：勾配、

s ：距離、 B ：ブレーキ力

を解くことによって求められる。この式のうち、動力車の種類、編成、けん引重量および運転する区間を決めれば、 W 、 T 、 R 、 G は既知となる。線路の曲線、分岐器、勾配や信号による速度制限

山陽本線上郡三原間列車ダイヤ (含宇野線・宇高航路)

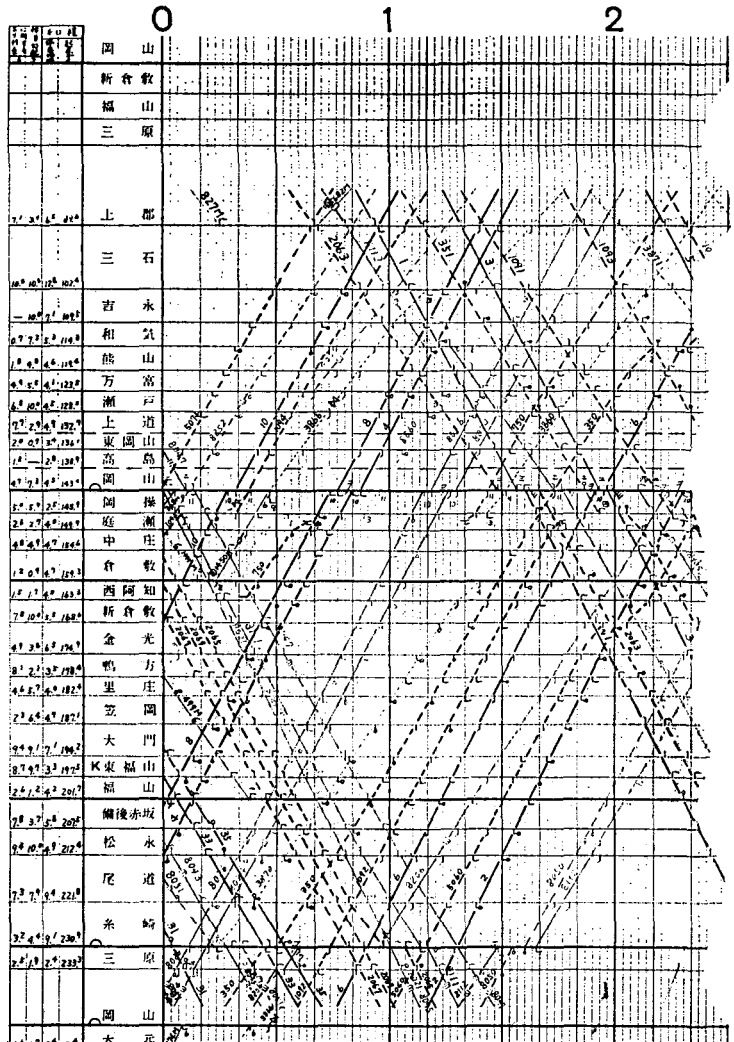


図2 列車ダイヤ図 (山陽本線の例)

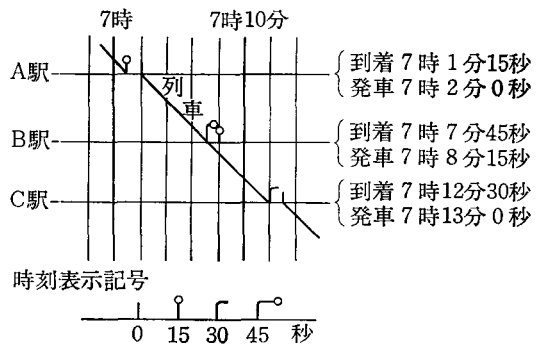


図3 2分目ダイヤと時刻表示記号

などに応じた通常の操縦条件を考慮して運転線図と呼ばれる「距離—速度曲線」, 「距離—時間曲線」を求める。この運転線図をもとに駅間ごとの計画上の最短運転時間を求める。この時間を「基準運転時分」と呼んでいる。

基準運転時分は、同一区間であっても、停車・通過、動力車の性能、編成・重量などによって異なるので、同一区間に対し数多くの種類が算出されている。

なお、運転線図および基準運転時分の算出は、鉄道技術研究所で開発した運転曲線計算システムによって行なわれている(図4)。このシステムはミニコンピュータに移植され、今年4月から各JR旅客鉄道会社で使用されている。

(3) 列車の間隔

同一方向の列車は、相互に安全を保つために一定の閉そく区間をとっていることは前に述べた。列車計画を立てる場合には、2閉そく区間以上の間隔をとって列車を設定することになっている(図5)。この区間を割り込んで列車を設定しても安全上の問題は無いが、信号の表示が注意信号(黄色)や停止信号(赤色)になり、基準運転時分ごりの運転ができなくなる。

同様に、折り返し駅において図6のように折り返し列車が出発する場合、出発する列車が反対側の線路へ抜けるまで到着する列車は、駅への進入はできない。

このように前後列車の間に開けなければならない運転間隔(運転時隔)や交差する列車による進路の支障時間(交差支障時分)は、線路や信号の設備状況、列車の運転性能などをもとに計算される。列車計画においては、図5, 6に示すように、駅の着発における2個列車相互の保つべき時間を運転時隔、交差支障時分と呼んでいる。

運転時隔および交差支障時分は、列車を設定する上において非常に重要であり、その時間の大小により、設定可能な列車本数、待避の可否などに影響を与え、ひいてはダイヤ構成の良悪に大きく

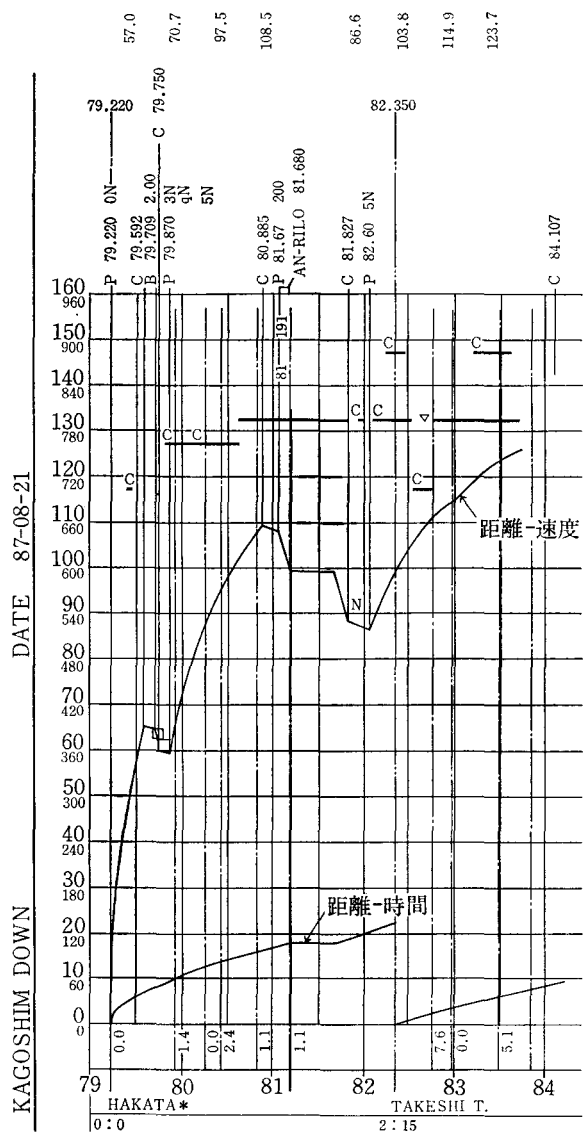


図4 運転曲線計算システムによる運転線図

影響してくる。

(4) 停車時間

停車時間は、旅客の乗降、貨物の積降ろしのために要する時間であるが、その時間の大きさは、旅客の数、貨物の量、車両構造、乗降設備などを勘案し決められる。しかしその外にも、列車の行き違い、待避、進路の取り扱い、車両の連結解放、乗務員の交代など鉄道側の理由によるものもある。旅客列車の場合、一般に中間駅の停車時間

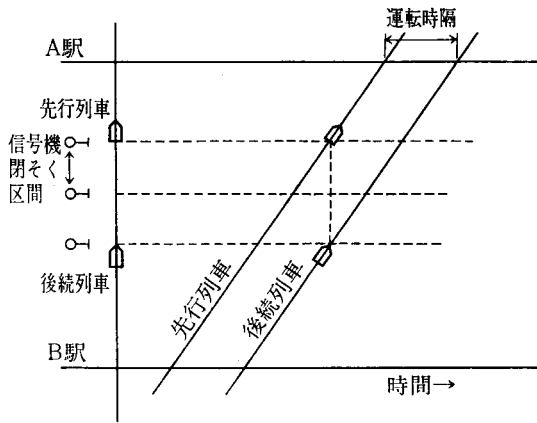


図 5 閉そくと列車運転時隔

は、旅客の乗降以外に特に理由がなければ、列車区間で30秒程度である。

(5) 余裕時間

基準運転時分は、通常運転時における最小運転時間であり、列車を設定するさいには、余裕時間を加える必要がある。余裕時間がないと、列車が遅延した場合、その遅れが到着駅まで回復不可能となり、さらに1本の列車の遅れが他の列車に波及し、遅れが拡大することになる。

列車の遅延は、線路や車両の故障、悪天候、乗客の乗り降りなどが原因のものばかりでなく、線路工事などによる徐行や臨時列車を運転するための時刻変更による遅延など計画的なものもある。

列車遅延の影響によるダイヤの混乱を防止するため多少の遅延に対しては、それを吸収できるだけの“ゆとり”として余裕時間をもたせている。余裕時間の与え方は、駅間の運転時間に加え余裕をもたせる方法のほか、停車時間に含ませることもある。与える余裕時間の大きさは、列車や線区の性格によって異なるが、一般に基準運転時分の2~3%前後位である。

(6) 列車ダイヤの設定

列車の運転時刻は、図7に示すように始発時刻、基準運転時分、停車時間、余裕時間から算出される。

一般に、 S_n 駅における到着時刻 T_n は、

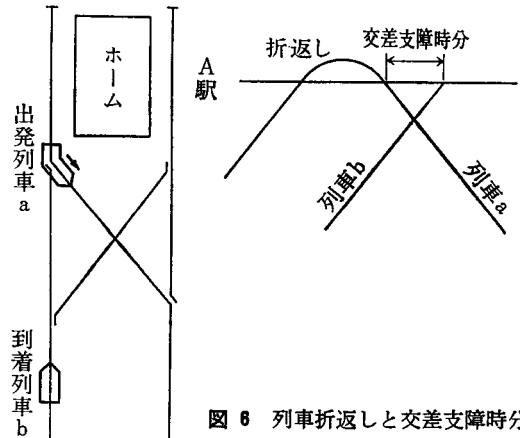


図 6 列車折返しと交差支障時分

$$T_n = T_0 + \sum_{j=1}^n t_j + \sum_{j=1}^n a_j + \sum_{j=1}^{n-1} b_j$$

ただし、 T_0 : S_0 (始発) 駅の発車時刻

t_j : $S_{j-1} \sim S_j$ 駅間の基準運転時分

a_j : $S_{j-1} \sim S_j$ 駅間の余裕時間

b_j : S_j 駅の停車時間

この式の各項のうち、基準運転時分は列車種別によって決まる定数である(到着線によって多少変わることもある)。停車時間は乗降の人数、列車の待避、接続や入れ換え作業の有無などによりほぼ決まってくる値であり、さらに後述するスジのゆすりなどを行ない、始発時刻と余裕時間が定まると運転時刻が確定することになる。

ダイヤ作成者は、輸送計画にもとづく列車計画の範囲内で、これらの変数を操作し、最も良い列

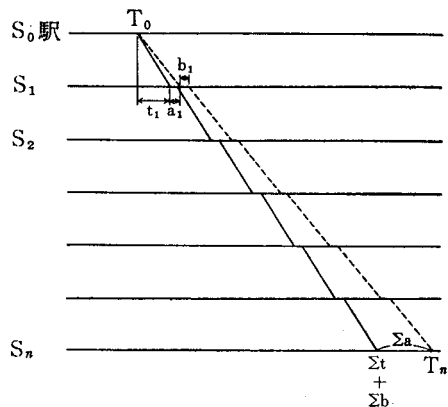


図 7 列車の時刻設定

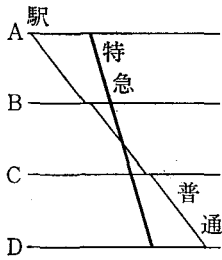


図 8 特急・普通の交差

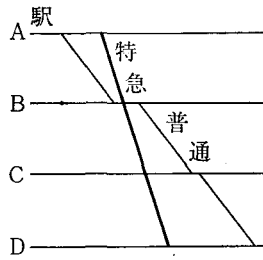


図 9 前方駅で待避

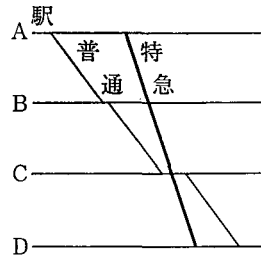


図 10 後方駅で待避

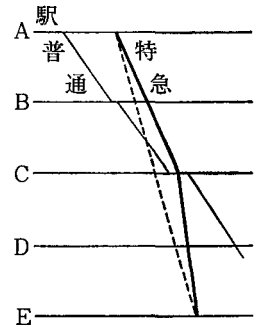


図 11 余裕時間の調整

車ダイヤを作ることが要求される。

たとえば、普通列車と特急列車を設定することを考えてみる。図 8 のように駅間で両方の列車が競合する場合、すなわち列車線が交わるケースのときは、駅で特急を待避するように変更してやる必要が生じる。

これを解消する方法は、いくつかある。

- ①普通列車の運転時刻を遅らせ、交差する手前の駅で特急列車を待避する (図 9)。
- ②普通列車の運転時刻を早め、交差する先方の駅で特急列車を待避する (図 10)。
- ③特急列車と普通列車相互の余裕時間を調整し一部区間の範囲で時刻合わせを行なう (図 11)。

さらに、これらを組み合わせたやり方もある。どの方法が良いかは諸々の条件を考慮して決められる。このように、列車の時刻を可能な範囲で変更し、列車を設定していくことを「スジをゆする」といっている。

ただし、これらの方法で必ずしもうまくゆくかどうかわからない。他の列車との競合、待避線やホームの有無など物理的条件チェックを満足することが必要であるほか、ある駅での接続や列車の運転間隔の適否などダイヤ構成上の判断が加味される。

4. 列車ダイヤ作成のシステム化

(1) マン・マシンシステムの採用

人間が行なっているダイヤ設定作業を調べてみ

ると、人間は、単に列車の時刻計算および他列車との競合を回避するスケジューリングを行なっているばかりでなく、列車の時刻を設定する段階において、輸送計画にたずさわってきた経験をもとに、図形 (ダイヤ図) を介して全体の列車計画を頭に入れた上で局所的な判断を行なっている。

計算機によって列車の運転時刻を計算、競合条件をチェックし列車ダイヤを書くことは、人間が長年の経験によって得た知識や技術を定形化することであり、むずかしい問題を含んでいるが、かなり人間に近いところまで論理を作ることは可能である。しかし、人間はダイヤを書きながら経営方針や社会的条件あるいは、あらかじめ定形化していないデータを含めて総合的に判断しており、それらを計算機の論理として定型化することはむずかしい。

したがって、計算機に負担させる機能と人間が行なう作業とを図 12 のように分割し、列車時刻の計算、競合等のチェックを計算機に行なわせ、その結果を人間が判断し必要な修正を加えることが可能な方式としたマン・マシン対話型の列車ダイヤ作成システム (DIAPS) を開発した。

このシステムは、マン・マシン性を良くするため、メニュー画面入力方式とし、入力操作はタブレットによる方式とした。さらに、表示装置は、グラフィックディスプレイ (GD) にダイヤ図、漢字グラフィックディスプレイ (KD) に時刻表を表示させ、同時にダイヤ図と時刻表を見ることを可能とした。

DIAPS のシステム構成を図13に示す。

(2) システムの概要

このシステムは、列車ダイヤテーブル（作成された列車時刻を登録する）および基礎データテーブル（列車ダイヤ作成に必要な基礎データが登録されている）から構成される列車ダイヤファイルと、列車ダイヤを作成し表示するプログラムおよび各種サポートプログラムとからなっている。

このシステムにおいては、特に人間が行なっているダイヤ作成作業に対応できるように通常のダイヤ設定機能の他に、

- 設定されている列車の時刻を変更し列車を割り込ませる優先設定機能
- 同じ種類の列車を繰り返し設定するパターン設定機能
- 列車の時刻を一部ずらす時刻ずらし機能
- 到着駅から逆に時刻を計算する逆引き機能などをもたせた。

DIAPS を使って新たに列車を設定する場合の操作は、次のようになる。

- ①列車の種類，列車番号，運転区間，始発時刻，停車駅等を与える。
- ②基礎データテーブルから該当する基準運転時分を取り出し運転時間を計算し，着発線を割り当てるとともに前後列車を捜し時隔をチェックする。
- ③その結果をGD上にダイヤ図，KD上に時刻表

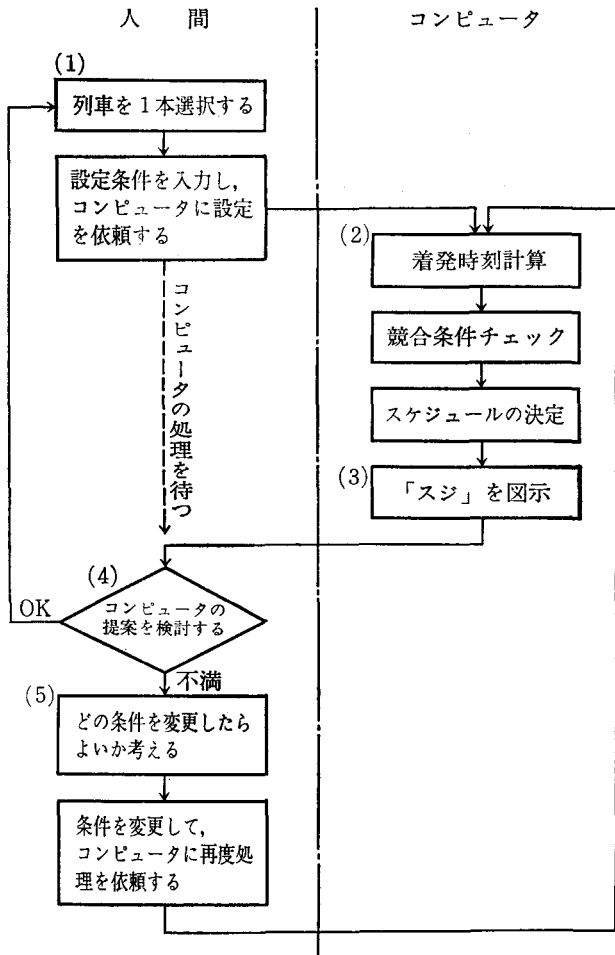


図 12 人間の役割とコンピュータの役割

として表示する。

- ④GD上のダイヤ図を見て，人間が必要な修正を

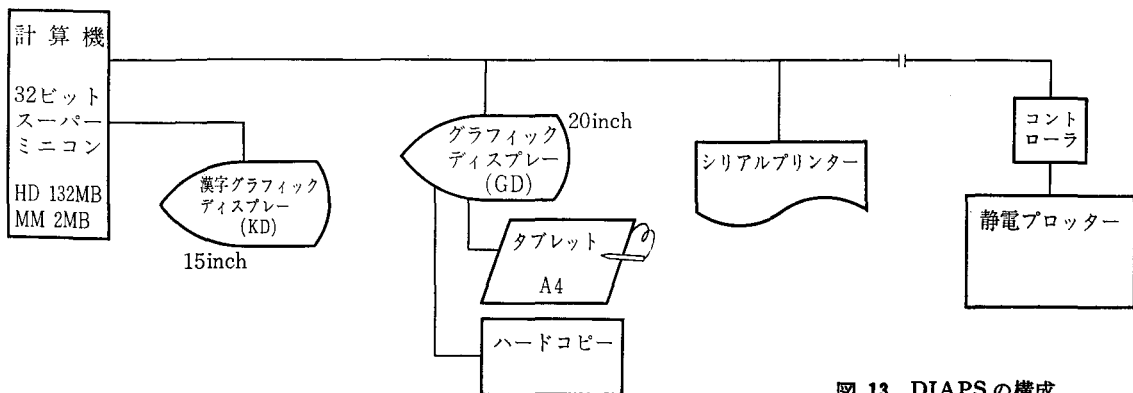


図 13 DIAPS の構成

加えながら、列車ダイヤを作成する。

- ⑤列車ダイヤを列車ダイヤファイルに登録する。
さらに、必要に応じダイヤ図、時刻表をプリントアウトする。

5. 車両運用と列車ダイヤ

列車ダイヤの作成作業に引き続き平行して列車を運行するのに必要な車両の使用方法を計画する。さらに、運転士、車掌、駅構内作業などを列車ダイヤにしたがって計画を立て、列車ダイヤにフィードバックしてゆくことになるが、ここでは列車ダイヤに最も大きく影響を与える車両運用についてのみ簡単に述べる。

車両の運用は列車ダイヤと一致していなければならない。車両のない列車は成り立たない。列車に充当する車両は、輸送需要の実態に合わせた運用が必要であり、1本の列車は途中で車両の分割や併合をすることもある。また、限られた車両を有効に利用するため車両運用の都合で列車の時刻、運転区間を変更することがある。一般にダイヤ上の列車数よりも車両運用上の列車の方が数が多くなり複雑である。

車両運用の計画に当っては、同一形式の車両あるいは性能の似ている車両をグループにして列車の種類に合わせ与えられた列車ダイヤに則して車両の配置されている基地ごとに車両の運用予定を定める。車両運用は、車種や線区により多種多様であるが、考慮しなければならない主な条件として次のような事例がある。

- ①車両の所属する車両基地から出て戻ってくるまでを単位（通常1日～数日間）として基本の車両運用を立てるが、ある駅を見た場合、1日の到着両数と出発両数とは等しくなければならない。等しくない場合は、等しくなるよう（回送）列車を設定する必要がある。
- ②列車がある駅で折り返すときは、車両の整備・検査、乗務員の移動、機関車の付替え、車両清掃などのため、ある一定以上の折り返し時間が

必要である。

- ③車両運用は、各種検査が決められた周期あるいは走行キロ以内に検査設備、要員が用意された箇所で開催できるように配慮されていなければならない。

6. おわりに

本文で述べた列車ダイヤのスケジューリングは基本計画に関してのみである。実際には、輸送は1日単位で切れるものではなく、列車ダイヤ、車両運用、乗務員運用は365日連続している。また臨時列車の運転や連休、時刻変更など毎日異なった列車ダイヤで運行されており、さらに車両運用、乗務員運用の変更が複雑にからみあっている、この実施計画がきちんとできて毎日の列車が正確に動いているのである。

現在、JR鉄道7会社で運転されている列車本数は、1日当たり約25,000本を数える。これら各列車は、綿密かつ正確な計画のもとに運転されている。今後は利用者のニーズに適合し、輸送需要に臨機に応じることのできる輸送計画の策定が経営戦略の手段としてみますます重要となるであろう。

参考文献

- [1] 飯田善久、大川水澄：「マン・マンによる列車ダイヤ作成システム」，鉄道技術研究所報告，No. 951，1975年2月
- [2] 飯田善久：「マン・マンによる意志決定手法の列車計画への応用」，鉄道技術研究所報告，No. 1257，1984年3月