

需要特性に適合した 通勤列車運行パターンの選択法

A Method for the Choice of Train Scheduling Pattern on Commuter Railway Lines
which Is Fitted to the Characteristics of the Demand

永井 邦彦*、家田 仁**、下大園 浩***、志田 州弘****

By Kunihiro NAGAI, Hitoshi IEDA, Hiroshi SHIMO-OZONO, Kunihiro SHIDA

Nowadays the improvement of train scheduling to relieve congestion comes to be more important. Because there are a huge number of feasible alternatives, the development of a method to narrow down the pattern of train scheduling is required. At First, typical sections of seventeen lines in reality are drawn and their characteristics are analyzed. Then four nonlinear programming problems are solved. The results are referenced, demand pattern models and train scheduling pattern models are set up. User's disutility on each case is evaluated by user's equilibrium assignment on time-space network. Then relationship between demand pattern and adequate train scheduling pattern is made to be clear.

1. 本研究の位置づけと構成

(1) 研究の経緯

通勤鉄道の輸送力増強は、現在も大都市の交通政策の重要な柱のひとつとなっているが、種々の制約から、例えば運政審答申にしても、必ずしも円滑に実現されているわけではない。このため、長期的大規模投資を補完する施策として、列車の本数、列車種別、その構成比、停車駅構成などによって特徴づけられる列車運行計画の改善を行うことにより利用者の便益を向上することも近年重要視されるようになってきた。^{1) 2) 3)}

キーワード：列車運行計画、利用者便益評価

- * 学生会員 東京大学大学院 土木工学専攻
(〒113 文京区本郷 7-3-1)
- ** 正会員 工博 東京大学助教授 土木工学科
- *** 学生会員 東京大学土木工学科
- **** 日本電産

列車運行計画に関する研究の系譜は、既に整理されている⁴⁾とおりであるが、これを踏まえて現在の研究開発ニーズをあげると次の3点に概ね集約されよう。

- ①利用者便益、事業者費用からみた列車運行計画代替案の合理的かつ能率的な評価法
- ②待避駅設備などの複雑な制約条件をみたす実行可能な列車運行計画の能率的な作成法
- ③実際の運行計画を作成する際のガイドとなる、望ましい運行計画パターン(イメージ)の発見方法

①については一連の研究^{3) 4)}により、利用者便益の評価が可能となり、事業者の費用評価も加えて現段階までの成果がコンピューターシステム化⁵⁾され、実線区の実務への活用も開始されている。今後は旅客の競合・優先関係などの明示的なとりこみによって、より詳細な分析を可能とする方法論の開発も望まれよう。

②についてはマン・マシンシステムによる運行計画作成者の労力低減をねらった研究⁶⁾が行われており、実務への応用を含めて最近急速に進んでいる。

③に関していえば、列車運行計画の直接的な最適化も関連するが、実際にはこれは容易でなく⁷⁾、混雑の影響が小さい都市間鉄道の停車パターンについて成功⁸⁾しているに過ぎない。むしろ通勤鉄道を対象とする場合、駅間OD交通量などの需要特性に適合した運行計画のパターンあるいはイメージを素案として提示し、これをもとに②により実際の運行計画を策定し、①により評価選定するという手順が実用的と考えられる。こうした目的のもと、現実の運行計画の典型的分析⁹⁾、仮想的な需要特性のパターンと運行計画の類型との適合性の良否⁴⁾が検討された。その結果、郊外から都心へ通勤者を運ぶフィーダータイプ路線、都市内のフラットタイプ路線など需要特性の別に、利用者便益の立場からみてどのようなタイプの運行計画が適切か大局的な傾向が把握された。しかしながら同時に、

- i) 設定された需要パターンが実際の線区の需要パターンの実証的な分析に必ずしも立脚しておらず、また余りにも単純化されている。
- ii) 例えばフィーダータイプ路線の場合、区域別タイプの運行計画が有利であることが示されたが、計画策定の素案としてはもう少し緻密なところまで示唆できるものでなくては実用上のニーズには応えられない。
- iii) 設定輸送力は一定に固定されており、現象の規模不変性が暗黙に仮定されている。現実路線の設定可能輸送力がそれぞれ限度をもつ以上この仮定には問題がある。

というような問題を残している。

以上より、本研究は、未だ途上にあるといえる研究ニーズ③について上記の問題認識を踏まえた上で、特に通勤路線として最も重要な役割を担う、郊外住宅地と都心とを結ぶフィーダータイプの路線¹⁾を対象に需要の特性に応じた実用的な列車運行計画のパターン（あるいはイメージ）を明らかにするものである。

(2) 研究の構成

上記の目的を達成するため、本研究では

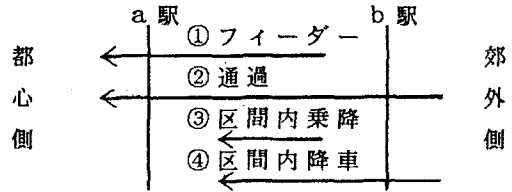


図-1 利用形態の分類

- ① フィーダータイプの区間のみを対象とするため、鉄道網が稠密で他線区との流入出が多く都心部とみなし得る区間や遠隔地の閑散区間を、線区の輸送量データを用いて除外する方法を提案し、
- ② その方法を実際の大都市通勤鉄道14社20線区に適用し、その需要状況及び運行計画を分析する。
- ③ 次項④の予備解析として、理想的な状況での運行計画を4つの非線形最適化問題として定式化し、列車本数配分、輸送力配分、区域割数、区域割点の最適値を求める。
- ④ 以上の結果をもとに需要水準等の異なる9種類の需要設定ケースおよび、輸送力水準と列車間役割分担の異なる21種類の運行計画代替案を作成する。
- ⑤ それらの組み合わせのうち、混雑率等から実現不可能なものを除外した168ケースについて、時空ネットワーク法³⁾により利用者の総損失を算出する。
- ⑥ 以上の結果により輸送需要パターンと利用者便益の点から見て望ましい列車運行パターンとの対応関係を明らかにする。

2. 大都市通勤線区の現状分析

(1) 分析対象線区・区間の抽出

前述のように、本研究ではフィーダータイプ区間のみを対象とするため、以下の方法で該当区間を抽出分離する。

まず、支線との流動は、分岐駅での乗降とする。その際、事業者による線区区分にこだわらず流動の少ない方を支線とする。ここで、ある区間に注目した場合の利用形態は①フィーダータイプ②通過タイプ③区間内乗降タイプ④区間内降車タイプの4種類に分類される（図-1）。

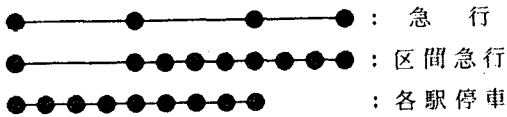


図-2 列車種別の分類

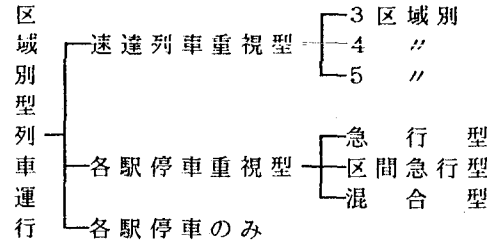


図-3 区域別タイプ運行計画の分類

ここで、①と②の利用者数にそれぞれの利用駅間数を加重して加えた数値（単位：駅・人）をフィード量 F とし、同様に③と④についてノンフィード量 NF と定義する。前者はフィーダータイプ線区に典型的な旅客の移動量を表し、後者はそれ以外の移動量を表す。距離でなく駅数を用いたのは、各線区ごとに注目すれば隣接駅間距離の変動は小さいため、取り扱いの簡便性を考慮したものである。該当線区に関して都心から昇順に1から m まで駅番号がついているとし、その途中駅 a, b 駅間を考えると、 i 駅→ j 駅のOD交通量を Q_{ij} とすると、

$$\begin{aligned}
 F &= \sum_{j=1}^m \sum_{i=a+1}^{b-1} Q_{ij} \cdot (i-j) \\
 &\quad + \sum_{j=1}^m \sum_{i=b}^m Q_{ij} \cdot (b-a) \\
 NF &= \sum_{j=a+1}^{b-1} \sum_{i=a+2}^m Q_{ij} \cdot (i-j) \\
 &\quad + \sum_{j=a+1}^{b-1} \sum_{i=b}^m Q_{ij} \cdot (b-j) \quad \dots(1)
 \end{aligned}$$

と表すことができる。この2数値の差（ $F-NF$ ）が最大となる区間 $a \sim b$ を取り出す。この方法により、都心側、遠隔地側の非典型区間を除外することができるものと考えられる。

(2) フィーダータイプ線区の需要特性

関東・関西の放射状路線の内、事業者の協力の得られた14社20線区に(1)で提案した手法を適用し、朝ラッシュー時間分のOD表から抽出された区間の特性を表すいくつかの数値を表-1に示す。

ノンフィード利用者数比率、ノンフィード量比率が明らかに大きい線区が3線区存在し、そのうち2線区は通過タイプ利用者率も高い。そこでこれら3線区は通常のフィーダータイプとは状況が異なるものと考え、以後これらを除外し、残りの17線区を分析対象とすることとする。

(3) フィーダータイプ線区の運行計画特性

次に、これら17線区の最混雑1時間についての運行計画パターンのタイプを見る。フィーダータイプ需要には区域別タイプが望ましいことは既往の研究⁹⁾より明らかである。ここでは区域別タイプ運行計画を、需要状況に対する輸送力の緩急配分により、a)速達性を重視した速達列車重視型b)列車別の混雑の均等化と待ち時間の削減を重視した各停列車重視型c)後者をさらに典型化した各駅停車のみの3つに大分類する。更にa)は区域割数によって細分類する。b)は列車種別を各事業者で個々に用いている名称にこだわらず急行、区間急行、各駅停車の3種別に分類(図-2)することにより、急行型、区間急行型、混合型の3つに細分類される(図-3)。実際の線区の朝ラッシュの運行計画(表-1)は、大多数が各駅停車列車重視型となっており、急行型、区間急行型、混合型がまばら等しい割合で存在する。また、少数ではあるが速達列車重視型も存在する。

3. モデルケースによる利用者便益評価

(1) 需要設定ケースの作成

ここでは、実線区の平均的な状況として、26駅(延長40km)からなる仮想的な線区を想定し、輸送需要と運行計画とを変化させて多数のケース設定を行った。

まず、実際のフィーダー線区のOD表のばらつきを平準化して楕円のみに注目し3次元表示すれば、台形を寝かせた形の「嶺」と平べったい三角柱になる(図-4)。この「嶺」の高さと傾斜とを変数としてOD表を作成する。その際、高さの要素は最大

表一 大都市通勤20線区の需要／運行計画特性

[illegible]

◇：駅数
 ☆：距離特性
 △：通過率
 □：待避可能
 ☆：最大断面通過人員（人／時）
 ☆：メーター（＝F/Fイーダー利用者数）
 ☆：メーター（＝N/Fイーダー利用者数）
 ○：ノンイーダー利用者比率
 （※：複々線）

断面通過人員について①高（8万人/時間）②中（5万人/時間）③低（2万人/時間）の3種、傾斜の要素は利用者の距離特性パラメーターについては長期的に増加傾向にあることも考慮し、①大（約65%）②中（約50%）③小（約35%）の3種、その組合せで9種類のOD表を作成する。

(2) 運行計画代替案の作成

運行計画代替案作成に先立ち、まず単純化された状況での最適化問題を考える。この問題を一般的に記述することは事実上不可能である⁷⁾ ため、ここでは本来同時最適化すべき4つの変数(列車本数配分、輸送力配分、区域分割点、区域数)を、条件付き個別変数最適化問題として取り扱う。この予備解析によって運行計画代替案作成のより適切な指針を得ることができる。(Appendix 参照)

列車運行計画としては輸送力水準について3種（図-5）、パターンについて7種（図-3）の組み合わせで21種類の運行計画を作成した。3種類の列車キロは輸送力の大小を表している。ただし大は列車キロが線路容量に達し、輸送力が飽和状態となっている。輸送力水準のコントロールは、朝ラッシュの事業者コスト一定という条件を考えると、列

車アワーで行う方が望ましいが、簡単のためここでは列車キロで代用した。また、追越し等の条件は一定とした。

これらの189ケースの組み合わせの内、輸送需要に対して輸送力が過小の場合は事実上輸送不能となるので除外し、残る168ケースについて検討する。

(3) 時空ネットワーク法による配分/評価計算

時空ネットワーク上での配分計算には次の様な交通量依存的なリンクコスト関数を用いて、利用者均衡配分を行う。

$$\text{利用者損失} = \text{乗車時間} + \text{混雑不効用} \\ + \gamma \cdot \text{待ち時間} + \delta \cdot \text{乗り換え回数}$$

ここで、

$$\text{混雜不效用} = \text{乘車時間} \cdot \frac{\alpha \cdot \text{乘車人員}}{\beta \cdot \text{列車定員} - \text{乘車人員}}$$

計算条件としては、利用者は目的地に到着しなければならぬ時刻に従って損失が最小な列車を選択するものとし、また到着時刻の分布は1時間幅の時間帯の中では均一とする。

なお、パラメータは文献⁹⁾における結果から、標準的と考えられる、西武池袋線におけるリンクフローデータを用いて推定されたもの ($\alpha=0.26$, β

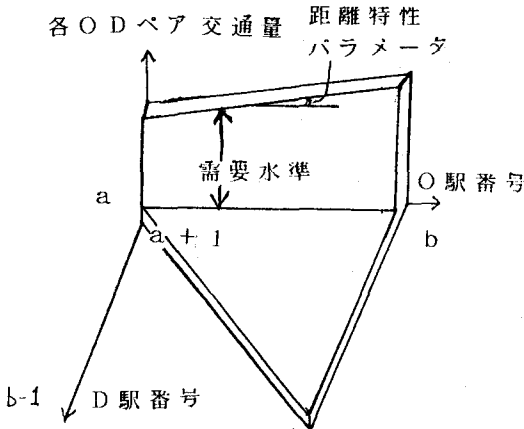


図-4 需要特性変数の意味

=3.15, $\gamma=1.6$, $\delta=4.5$) を用いた。文献³⁾⁴⁾の定義に従って利用者損失を乗車時間、混雑不効用、乗り換え不効用、待ち時間不効用の別に計算し、
 車内損失=乗車不効用+混雑不効用
 混雑損失率=混雑不効用/車内損失
 駅内損失=乗り換え関連不効用+降車時不効用
 乗り換え損失率=乗り換え関連不効用/駅内損失
 とする。各ケースの総不効用、車内損失率、混雑損失率、乗り換え損失率を表-2に示す。

4. 考察

(1) 計算結果に関する考察

以上より適切な列車運行計画パターンを需要特性、輸送力水準に応じて図示したのが図-6である。適切な列車運行計画パターンは、列車キロ水準にさほど影響を受けず、輸送需要が大きく都心から遠い区域からの利用が多い場合は速達列車重視型、輸送需要が小さく比較的都心側近くからの乗車距離が短い場合は各駅停車重視型の区域別ダイヤとなった。これは常識的にも納得しやすい結果であるが、今回具体的にどのような需要特性の場合にそうなるのか定量的に明らかになった点が特長である。現在の東京圏・関西圏の標準的な通勤線区についていえば、ピーク時は速達列車重視型の方が望ましく、オフピーク時は各駅停車重視型の方が望ましいことになる。

需要大・長距離型のように混雑が大きく問題となるケースほど速達型が望ましいのは、待ち時間と車内損失とのトレードオフで、混雑率が高いときほど車内損失が大きく、時間短縮が重要となるためであ

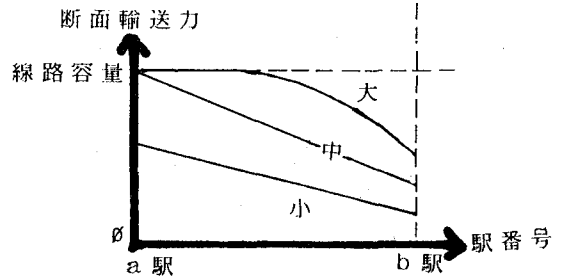


図-5 輸送力の設定

ると考えられる。また、輸送力水準が低い場合に速達列車重視型の領域が若干縮小しているが、これは各駅停車列車の混雑が原因となっていると考えられる。

速達列車型の場合、予備解析【D】で得られた式によると最適区域数は列車キロに応じて3~4区域となるが、本解析では大半の場合に3区域別が適切であるという結果となった。これは、ノンフィーダー利用者にとっては区域割が少ない方が待ち時間、乗り換え等の回数が減るため、【D】の計算値は区域割の上限値として考えることが適切であろう。

需要・輸送力がともに大で利用者の距離特性が近距離型の場合に限っては、各駅停車のみの運行計画が適切となる。この状況では少数でも速達列車を設定すれば利用者の多い各停列車が混雑し、利用者の混雑不効用を拡大するためであると考えられる。

需要水準
(万人)

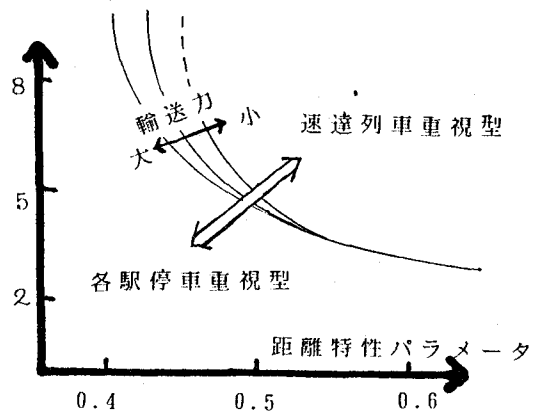


図-6 望ましい運行計画

表-2 計算結果

輸送力	距離パラメータ小												距離パラメータ中											
	2万人				5万人				8万人				2万人				5万人				8万人			
大	4415	87	7	5	12101	85	13	8	23249	89	28	6	5042	87	5	6	14393	88	18	7	30057	90	35	11
	4729	82	4	9	13218	84	16	9	24131	88	31	21	5282	83	5	8	14897	85	17	8	32104	88	39	14
	5014	78	4	12	13853	80	14	13	24770	83	34	15	5543	78	4	11	15557	80	16	11	32118	84	38	15
	4449	78	5	51	12544	81	18	49	24897	83	33	47	5157	80	7	53	15520	83	23	53	34524	86	43	51
	○4234	83	5	39	○11896	85	17	42	24185	88	33	37	○4836	85	6	40	14958	88	24	44	32709	88	40	41
中	4355	84	4	16	12195	86	16	18	24131	88	31	21	4999	86	6	15	14972	89	22	20	31972	89	36	28
	4424	92	4	33	12043	92	13	43	○22924	93	27	34	5323	92	5	44	14887	93	16	46	30184	92	33	36
	4820	77	5	19	13414	79	17	19	39089	88	59	19	5288	79	5	19	○14964	81	19	19	○47028	90	62	19
	5009	71	5	23	13985	74	18	22	56146	89	73	24	5501	74	5	24	15709	77	20	23	78892	92	78	25
	5040	72	6	32	14379	74	21	25	83137	90	82	28	5631	74	6	30	16350	76	23	26	105813	90	84	31
小	○4336	81	5	40	○2250	83	18	43	○26150	86	38	46	○5088	83	6	44	15458	86	25	46	63102	91	71	57
	4474	81	6	36	12868	82	19	40	27947	84	40	42	5185	84	8	34	16112	86	27	39	72311	90	74	55
	4563	79	5	16	13213	80	18	22	28149	83	40	29	5444	80	7	19	16772	83	27	26	63742	89	70	43
	4681	88	5	50	13180	89	17	59	27294	88	36	56	5680	86	8	62	16964	89	23	62	64941	89	68	64
	4828	76	6	13	15289	81	31	13					5471	77	7	12	○17960	82	34	13				
大	4968	75	8	20	21417	84	53	20					5500	77	8	23	24407	86	53	23				
	5400	67	8	24	21540	76	50	25					5871	71	8	26	26479	80	55	28				
	4603	81	7	37	14082	82	26	46					5531	81	10	43	20105	83	38	56				
	○4428	80	7	40	○13498	83	26	42					○5192	83	9	42	19466	83	45	56				
	4706	79	7	20	14694	81	28	19					5544	81	10	22	19642	82	44	49				
中	4843	86	7	53	14824	87	25	52					5898	86	8	62	20450	87	35	62				
	5739	87	7	5	○17534	91	23	8	○39198	92	42	14												
	5902	84	6	8	18105	87	25	8	43622	89	48	26												
	6140	79	6	10	17952	83	21	12	45535	86	50	30												
	○5958	82	10	56	18992	85	26	56	58137	89	60	56												
小	5688	86	8	44	18739	89	29	46	55231	90	58	51												
	5700	88	8	12	18291	91	27	26	46051	90	50	40												
	6248	93	6	50	18197	93	20	44	42055	90	43	54												
	○5816	80	7	19	○18466	85	30	20	○157088	96	88	30												
	6047	77	7	25	19876	82	34	25	230479	97	92	28												
大	6276	76	8	28	28743	84	54	35	240929	95	92	36												
	5892	84	8	47	21517	88	38	53	236816	96	91	67												
	5955	85	10	33	23092	88	42	47	237632	95	91	64												
	6283	81	10	23	24718	86	44	32	234632	96	91	51												
	6721	88	8	65	23786	87	35	58	235623	95	90	75												
中	6219	79	10	12	43056	91	71	18																
	6097	80	10	25	○42839	91	72	27																
	6428	74	10	27	54988	88	77	30																
	6553	81	13	50	45853	87	69	63																
	○6031	85	12	44	45014	92	71	54																
小	6511	84	14	26	47130	90	71	48																
	7036	87	11	66	46112	89	67	67																

各ケース内の運行計画は、図-3の順序と同じ。
左から移不効用(10⁴秒・人)
車内損失率、混雑損失率、乗り換え損失率

(2) 計算結果と現状との差異に関する考察

以上の様に、ラッシュ時に望ましいパターンは速達列車重視型区域別ダイヤであるが、現状は各停重視型が多い。このようなギャップが生じている主要な原因として以下の3点が挙げられよう。

第一に歴史的経緯である。都心側の利用者が多く、総利用者数の少ない時期には、各停列車重視型が望ましい。しかし、相対的に路線密度の低い郊外へ都市化が進展するにつれ、一駅あたりの利用者数はむしろ郊外の方が大きくなり、同時に利用者の絶対数も大きくなる。従って、適切な列車運行パターンは各停列車重視型から速達列車重視型へと変化する。

第二に列車待避制約である。速達列車を多数設定しようとしても、列車待避可能場が限られているため(表-1) 実質的に速度が低下してしまう。そのため運行計画作成者は「停車しないだけで遅い急行」より各停を多数設定した方が良いと判断していると思われる。

第三に乗降時間である。各停を削減すると乗降時間が伸びて遅延原因となり、速達列車の速度も低下してしまう。

以上のように、各停列車重視型から速達列車重視型への変更が必要となるにもかかわらず、各駅周辺住民の利害関係等の問題から停車駅見直しが進まず、速達列車重視型に移行できない場合についても、停車駅見直し効果の積極的啓蒙、既設待避設備の有効利用、将来的に複々線化が予定されている場合における効果的な駅部のみの先行実施、一部試行的に導入されている多扉車による停車時間短縮等によりこれら現実線区特有の原因を除去し、解決の方向付けをすることも可能であろう。

5. まとめと今後の課題

- i) 実際のフィーダータイプ線区の需要特性、列車運行計画の分析を行った。
- ii) 現実路線の設定可能輸送力の限度を考慮したシミュレーションにより、需要水準、距離特性パラメータにより表される需要特性に応じた望ましい運行計画パターンを提示した。
- iii) 今後の課題としてはフィーダータイプ以外の需要特性、たとえば都市内タイプ、通過タイプ、環状線などの複心タイプの線区の分析がある。

6. 謝辞

まず、本研究は文献⁹⁾に対する京都大学・中川大氏、筑波大学・田村享氏の建設的かつ有益な示唆から出発していることを記し謝意を表したい。また研究にあたってのデータ解析などでは、西日本旅客鉄道（前当研究室）善本明宏氏に献身的な御協力をいただいた。さらに東京大学・越正毅教授、中村英夫教授、鉄道総合技術研究所・野末尚二室長、日本鉄道運輸協会大塚和之理事には研究実施の途上で極めて多くの助言をいただいた。あわせてここにお礼を申し上げたい。

Appendix

列車運行計画代替案策定のための予備解析

A. 列車本数が限られているときの列車本数の種別別配分

ここでは、①乗車する列車種別固定、②利用者等分布到着、③混雑効果無視、④各種別の列車は等間隔到着と仮定し、時間帯長 T_p 、列車本数 n 、種別 i の利用者 Q_i を定数として、総待ち時間 Z を最小化するように種別 i の本数 x_i を決定する。

$$\min_{x_i} Z = \sum_i \frac{Q_i \cdot T_p}{2x_i} \quad \text{s.t. } x_i \geq 0 \quad \text{for } \forall i, \sum_i x_i = n \quad \dots(1)$$

これは凸問題となり、解は

$$x_i = \sqrt{\frac{T_p \cdot Q_i}{2\lambda}} = C\sqrt{Q_i} \quad (C \text{ は定数}) \quad \dots(2)$$

$$\sum_i x_i - n = 0 \quad \dots(3)$$

(3)を満たすように(2)の C を決めればよい。従って列車本数を、各種別利用者の平方根に比例して配分すればよい。…【A】

B. 車両アワーが一定（ピーク）または車両キロが一定（オフピーク）のもとでの列車間輸送力配分

ここでは①乗車する列車固定、②混雑不効用関数 $f(R_{ij})$ （混雑率に対し凸、単調増加）を仮定し、 i 列車 j 区間の利用者 Q_{ij} 、 i 列車 j 区間の所要時間 T_{ij} 、 j 区間の長さ L_j を定数として、総混雑不効用 Z を最小化するように i 列車 j 区間の輸送力 C_{ij}

を決定する。

$$\min_{C_{ij}} Z = \sum_i \sum_j Q_{ij} \cdot T_{ij} \cdot f(R_{ij})$$

ただし R_{ij} は混雑率をあらわし、 $R_{ij} = \frac{Q_{ij}}{C_{ij}}$

制約条件

$$C_{ij} \geq 0 \quad \dots(4)$$

$$1) \sum_j T_{ij} \cdot C_{ij} = T \quad (\text{車両アワー一定}) \quad \dots(4-1)$$

$$2) \sum_j L_j \cdot C_{ij} = L \quad (\text{車両キロ一定}) \quad \dots(4-2)$$

これは凸問題となり、

$$1) \text{の解は } R_{ij}^2 \frac{df}{dR_{ij}} = \text{const} \quad \dots(5-1)$$

f は下に凸ゆえ R_{ij} 一定。

$$C_{ij} \propto Q_{ij}$$

すなわち、ピーク時は各列車、区間の混雑率を一定とするように編成長を決めればよい。…【B-1】

$$2) \text{の解は } \frac{R_{ij}^2}{V_{ij}} \frac{df}{dR} = \text{const} \quad \dots(5-2)$$

ただし V_{ij} は速度で、 $V_{ij} = \frac{L_j}{T_{ij}}$

したがって、オフピーク時は速度の高いところほど混雑させることになる。…【B-2】

C. 区域割の位置

ここでは①混雑不効用なし、②利用者は空間的に等分布（→すべてターミナル駅へ）、③1パターンに各種別1本と仮定し、急行区間の速度 V^* 、各駅停車の速度 $V_0 \sim V_{m-1}$ （添字は急行の本数。従って $V_i > V_j$ if $i < j$ …【*】）、全区間長 λ 、乗客密度（人/km）= b を定数として、総乗車時間を最小化するように区間分割点 $x_0, \dots, x_m$ （ $x_0 = 0, x_m = 1, x_i < x_j$ if $i < j$ ）を決定する。

$$Z = \sum_{k=1}^m \left(\int_{\lambda x_{k-1}}^{\lambda x_k} \frac{b(t - \lambda x_{k-1})}{V_{m-k}} dt + \frac{\lambda^2 x_{k-1} b (x_k - x_{k-1})}{V^*} \right) \quad \dots(6)$$

$Z^* = Z / \lambda^2 b$ とおく。

$$\frac{\partial Z^*}{\partial x_k} = W_k(x_k - x_{k-1}) - W_{k+1}(x_{k+1} - x_k) \dots (7)$$

$$\text{ただし } W_k = \frac{1}{V_{m-k}} - \frac{1}{V^a} \quad (>0)$$

このとき $W_k > W_{k+1}$ (【*】より)

$$X \left[\frac{\partial^2 Z^*}{\partial x_i \partial x_j} \right] X^T = x_1^2 W_1 + x_{m-1}^2 W_m + \sum_{k=2}^{m-1} W_k (x_k - x_{k-1})^2 > 0 \dots (8)$$

ゆえに凸問題。 ($X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_{m-1})$)

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z^*}{\partial x_k} = 0 \quad \text{を解くと、} W_k > W_{k+1} \text{ より、} \\ x_k - x_{k-1} < x_{k+1} - x_k \quad \dots (9) \\ (k = 1, 2, 3, \dots, m-1) \end{aligned}$$

したがって、ターミナルから遠くなるほど区域割長さは長くすることになる。 …【C】

ただし、複々線の区間については $V_1 = \text{一定}$ 、したがって $W_1 = \text{一定}$ となり、区域割長さ一定となる。

【A】【B】【C】を総合的に勘案すると、朝ラッシュの場合、利用者が線区に均等に分布していれば、区域割はターミナル側にシフトし、編成長と列車本数を各種別の輸送人員の平方根比でそれぞれ分配するのが望ましい。現実の線区で各停が急行より編成長が短いことが多いが、この意味では合理的である。但し、混雑が激しい場合、編成長はプラットフォーム長に制約されるため、均等割・種別別本数均等に近づくと考えられる。

D. 区域割数

ここでは①混雑不効用なし、②利用者は空間的に等分布(→すべてターミナル駅へ)、③典型的な区域別ダイヤ、④等区間割、⑤列車キロ一定、⑥一駅通過あたり節約時間一定と仮定し、線区長 l 、列車キロ L 、列車本数 n 、駅数 i 、通過時節約時間 a 、時間帯長 T 、パターン長 T_p 、を定数として全時間損失 Z を最小化するように区域数 m を決定する。

区域数 m の時、1 パターンの列車キロ

$$l \sum_{k=1}^m \frac{k}{m} = \frac{l(m+1)}{2} \quad \dots (10)$$

一人あたり待ち時間

$$\frac{T_p}{2} = \frac{T(m+1)}{4L} \quad \dots (11)$$

急行運転による一人あたりの節約時間は

$$\frac{a}{m} \sum_{k=1}^m \frac{k-1}{m} i = a l \frac{m-1}{2m} \quad \dots (12)$$

従って一人当たりの全時間損失は

$$\min_m Z = \frac{T l (m+1)}{4L} - a i \frac{m-1}{2m} \quad \dots (13)$$

ただし m は自然数であるが、非負の実数であると考えたと凸問題となり、

$$m = \sqrt{\frac{2a}{T} i \frac{L}{l}} \quad \dots (14) \quad \dots \text{【D】}$$

たとえば、 $T = 60(\text{min})$ 、 $a = 1(\text{min})$ 、 $i = 24$ 、 $L = 20 l$ とすると、区域数 $m = 4$ となる。

参 考 文 献

- 1) 曾根ほか：鉄道ピクトリアル・特集<快適通勤>、鉄道図書刊行会、1990. 3/1991. 5
- 2) 川島：新東京圏通勤電車事情大研究、草思社、1990. 7
- 3) 家田、赤松、高木、畠中：利用者均等配分法による通勤列車運行計画の利用者便益評価、土木計画学研究・論文集6, pp. 177-184, 1988. 11
- 4) 家田、志田、永井：モデルケース分析による通勤列車運行計画の便益特性の分析とその実用評価法、土木計画学研究・論文集8, pp. 217-224, 1990. 11
- 5) 志田：列車運行計画の評価システム (IEDIS の開発)、東京大学大学院修士論文、1991. 3
- 6) 飯田：マンマシンによる意思決定手法の列車計画への応用、鉄道技術研究所報告1257, 1984. 3
- 7) 赤松、古川、家田：利用者便益からみた列車ダイヤ最適化に関する基礎的研究、土木計画学研究・講演集11, pp. 243-250, 1988. 11
- 8) 永井、家田：利用者便益からみた都市間鉄道の停車パターン改善法、土木計画学研究・講演集13, pp. 501-508, 1990. 11
- 9) 古川、高木、家田：列車ダイヤパターンと利用者便益との関連性に関する分析、土木計画学研究・論文集7, pp. 131-138, 1989. 12
- 10) 志田、古川、赤松、家田：通勤鉄道利用者の不効用関数パラメータの移転性に関する研究、土木計画学研究・講演集12, pp. 519-525, 1989. 12