

## 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>2</b>
1.1	背景	2
1.2	研究の目的	2
1.3	論文の構成	3
<b>2</b>	<b>鉄道路線のモデル化</b>	<b>4</b>
2.1	路線のモデル化	4
2.1.1	線路のモデル化	4
2.1.2	駅のモデル化	5
2.1.3	列車のモデル化	5
2.2	ダイヤの設定	9
2.3	ダイヤグラムについて	10
2.4	シミュレータの画面	11
<b>3</b>	<b>利用者不満度関数の定義</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>寺田寅彦の市電モデル</b>	<b>17</b>
4.1	寺田寅彦の市電モデルとは	17
4.2	寺田モデルの再現	17
4.3	寺田モデルが成立する条件	18
<b>5</b>	<b>運転整理について</b>	<b>20</b>
5.1	運転整理の手法	20
5.2	時間調整とは	20
5.3	時間調整を行ったとき	21
5.4	どの列車を時間調整すべきか	23
5.5	時間調整の最適解の探し方	25
<b>6</b>	<b>最適な運転整理案の追究</b>	<b>26</b>
6.1	放射線の場合	26
6.1.1	放射線の2分間隔ダイヤ	26
6.1.2	放射線の4分間隔ダイヤ	32
6.2	環状線の場合	38
6.2.1	環状線の2分間隔ダイヤ	38
6.2.2	環状線の4分間隔ダイヤ	44
<b>7</b>	<b>まとめ</b>	<b>49</b>

## 1 序論

### 1.1 背景

都市部を走る鉄道路線では、どこかで列車に遅れが発生すると、遅れは路線全体に波及していき、収拾がつかなくなる。特にラッシュ時に2分間隔で列車の運行を行うような過密路線であれば、とある列車がわずか2分遅れたとすると、次の駅以降で列車1本分の輸送力が失われることになり、たちまちホームには人が溢れ大混乱となり、利用者は不便を強いられる。

そうならないためにも、ダイヤの乱れが発生したときには、速やかにダイヤを回復させることが求められる。鉄道会社には、指令所という場所が設けられており、列車の運行を常に管理している。ダイヤの乱れが発生した時には、そこで働く司令員が、各列車や駅に指示を与え、ダイヤを正常に回復させる。司令員の腕の良し悪しによっては、ダイヤが数時間で正常に回復する場合もあれば、終電まで遅れを引きずってしまう場合もあり、腕の見せ所ともいえる。



図 1: ダイヤが乱れて混雑するホーム  
(2012年4月3日16時頃、JR大阪環状線大阪駅にて、列車が30分ほど遅れた時の様子)

### 1.2 研究の目的

ダイヤ乱れが発生した際には、いかにしてダイヤを回復させるかが、その後の利用者の利便性に大きく影響してくる。前述したとおり、司令員の腕の良し悪しによっては、ダイヤがいつまで経っても回復しないことがあり、多くの利用者に迷惑をかけてしまうことになる。そこで本研究では、鉄道路線をモデル化しコンピュータ上で様々なシミュレーションを行うことにより、効率的なダイヤ回復の手法（運転整理<sup>1</sup>）を追究していくことを目的としている。

<sup>1</sup>[1]の137ページでは、「事故や災害などが起こって列車運行に乱れが生じた時に、ダイヤを一時的に変更して列車運行を正常に戻す試み」と定義されている。どのような手法があるかは、§5.1で述べる。

### 1.3 論文の構成

まずは第2章で、本研究で取り扱う鉄道路線のモデル化と、研究を行うために作製したシミュレータについて述べる。そして第3章では、鉄道ダイヤの利便性を乗客の不満度の大きさを評価する、利用者不満度関数を定義する。第4章では寺田寅彦が[4]の「電車の混雑について」という随筆中で述べている市電の法則性を、シミュレータを用いて再現した。次に第5章では今回取り扱う運転整理の手法である時間調整について解説し、第6章では、定義した路線ごとに最も最適な時間調整の手法を考える。

## 2 鉄道路線のモデル化

コンピュータ上で鉄道運行のシミュレーションを行うために、鉄道運行の様子を再現するシミュレータを作製した。鉄道路線は大きく分けて、放射線と環状線<sup>2</sup>に分類される。本研究では、放射線と環状線の双方をモデルとして扱う。

### 2.1 路線のモデル化

本研究では、鉄道路線を構成する要素を、“線路”、“駅”、“列車”の3つに分割し、それぞれをモデル化して組み合わせることで仮想的な鉄道路線を再現している。この章では、それぞれの要素の定義の仕方と詳細な設定について述べる。

#### 2.1.1 線路のモデル化

線路をモデル化する上で、まずは“閉塞”という概念について説明する必要がある。閉塞とは、鉄道の安全を確保するために欠かすことのできない考えであり、閉塞が考慮されていない鉄道は存在しないといってもよい。

閉塞を簡単に説明すると、線路を適当な区間ごとに分割し、1つの区間には1つの列車しか進入できないようにし、列車同士の衝突事故を回避するという考え方である。閉塞と閉塞の境界に信号機を設け、列車が次の閉塞に進入しても良いか否かを、運転士に知らせる。閉塞の概念を図2に示す。

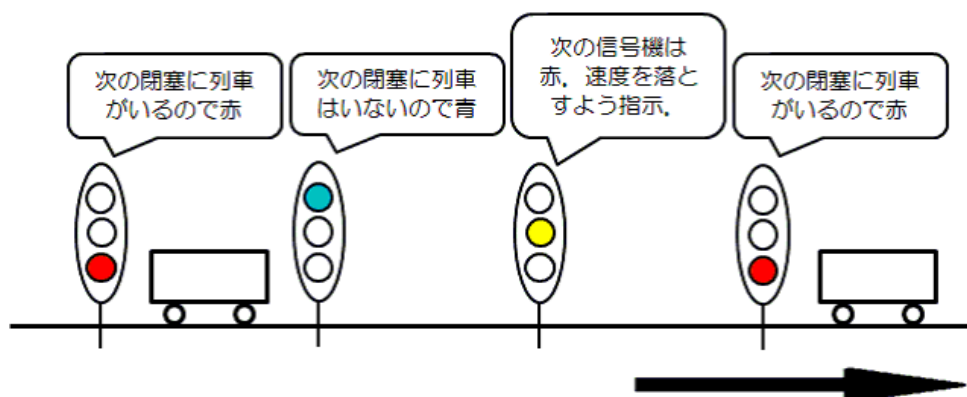


図 2: 閉塞の概念

信号機が青色である場合は、所定の速度で次の閉塞へ進入してよい。信号機が赤色の場合は、次の閉塞には列車が存在するので、信号機の手前で停止しなければならない。また、赤信号の手前の信号は、次の信号機までに余裕を持って停止できるように速度を制限する（鉄道会社によって様々であるが概ね 40km/h ~ 55km/h）黄色を現示する（道路交通の信号機とは色の意味が異なる。）

本研究では、線路を配列を用いて定義し、各配列要素に列車の存在を示す値を格納し、次の配列要素に列車が存在する場合は列車を停止させる、という仕組みを取り入れることで、閉塞の概念を再現している。

具体的な設定は以下のとおりである。

<sup>2</sup>“放射線”の対義語としての“環状線”は、都心から一定の距離を保ちながら、複数の放射線と交わる路線という意味であり、必ずしも路線が一周している必要は無いが（JR おおさか東線や JR 横浜線も環状線）、本研究では“環状線”という言葉をあくまで路線が一周している路線（JR 大阪環状線、JR 山手線等）という意味で用いる。

- 放射線の場合は要素数（閉塞の数）166，環状線の場合は要素数 176 の配列を定義する．
- 各閉塞の長さは，100m とする．
- 最初の閉塞から順に通し番号を付け，それを各閉塞の名前とする．
- 環状線の場合，最後の閉塞を抜けたら最初の閉塞に戻るようにする．

### 2.1.2 駅のモデル化

先ほど定義した線路の閉塞に，駅を配置していく．駅は要素として，駅名，駅名の通し番号，存在する閉塞の通し番号，駅にいる乗客数，単位時間当たりに来る乗客数の情報から構成される．具体的な設定は以下のとおりである．

- 通し番号 1 の閉塞に最初の駅を配置し，そこから 10 個の閉塞おきに，合計 16 個の駅を配置する．
- 駅名は最初の駅から順に A,B,C,...,P とする．
- 各駅の単位時間当たりに来る乗客数は 1 人とする（単位時間は 1 秒とする）
- ただし，放射線の場合，最初と最後の駅での単位時間当たりに来る乗客数は 0 人とし，環状線の場合，最初の駅での単位時間当たりに来る乗客数は 0 人とする．

線路（閉塞）と駅を組み合わせたイメージを図 3 に示す．

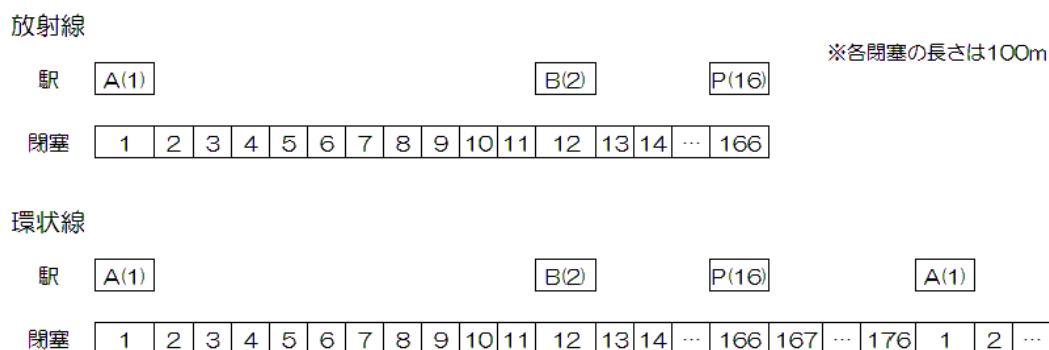


図 3: 線路（閉塞）と駅のイメージ

### 2.1.3 列車のモデル化

先ほど定義した線路の閉塞に，列車を配置していく．列車は要素として，列車番号，定員，乗車人数，表定速度，現在地の座標，現在地の閉塞の通し番号，駅ごとの降車人数の割合，単位時間当たりの乗車可能人数，各駅の計画発着時刻，各駅の実績発車時刻の情報から構成される．列車は 2 分間隔で運行する場合と 4 分間隔で運行する場合を考え，それぞれの場合で設定が異なる部分がある．

具体的な設定は以下のとおりである．

- 列車番号は列車を一意に識別する番号であり，重複の無いように割り振る．

- 列車の表定速度は単位時間当たり 10 m とする .
- 現在地の座標にその列車が存在する座標を ( 1 つの閉塞が 100m の長さなので , 駅の閉塞の通し番号に 100 を乗じることで座標を計算する ) 記録する .
- 放射線の場合 , 最後の駅まで , 乗客の降車は無く , 最後の駅で全ての乗客が降車する .
- 環状線の場合 , 最初の駅に戻るまで乗客の降車は無く , 最初の駅に戻ったとき全ての乗客が降車する .
- 乗客の降車は , 後述する駅での停車時間内で一律に行われるものとする .
- 各駅の実績発車時刻には , 実際にシミュレーションを行った際の各列車が各駅に到着した時刻 , 各駅を発車した時刻を記録する .
- 各駅の計画発着時刻については , §2.2 で詳しく述べる .

また , 以下の設定は 2 分間隔で運行する場合と 4 分間隔で運行する場合で異なる .

- 放射線 , 環状線ともに , 2 分間隔の場合は各駅に 16 個の列車を配置し , 4 分間隔の場合は 1 駅置きに 8 個の列車を配置する . 現在地の閉塞の通し番号にその列車が存在する閉塞の通し番号を記録する .
- 列車の定員は 2 分間隔の場合は 1000 人 , 4 分間隔の場合は 2000 人とし ( 列車の数が半分になっても輸送力を 2 分間隔の場合と同等にするため ) , 乗車人数は区間ごとに値を保持する . 定員と乗車人数から , 列車の混雑率 (%) 計算する .
- 駅で単位時間当たりの乗車可能人数は 2 分間隔の場合は 11 人 , 4 分間隔の場合は 21 人とする . 駅には単位時間当たり 1 人の乗客が来るので , 列車が駅に停車中は , 2 分間隔の場合は単位時間当たり 10 人ずつ , 4 分間隔の場合は 20 人ずつ駅にいる乗客が減少していくことになる .

2 分間隔の場合の放射線での列車と駅のイメージは以下のとおりである .

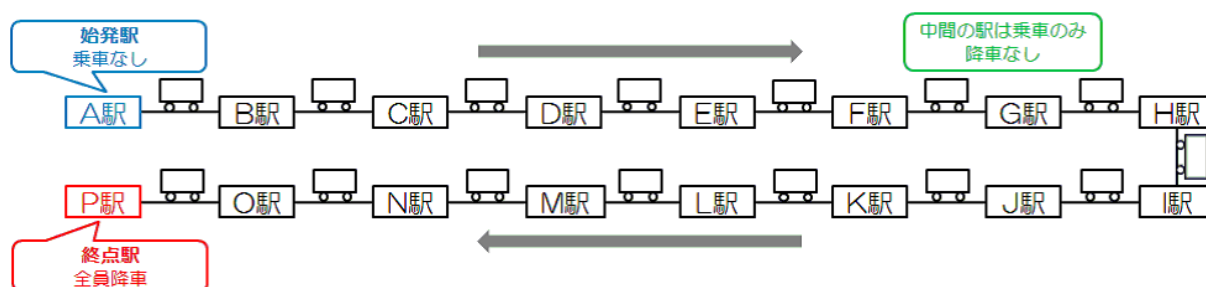


図 4: 放射線のイメージ

2分間隔の場合の環状線での列車と駅のイメージは以下のとおりである。

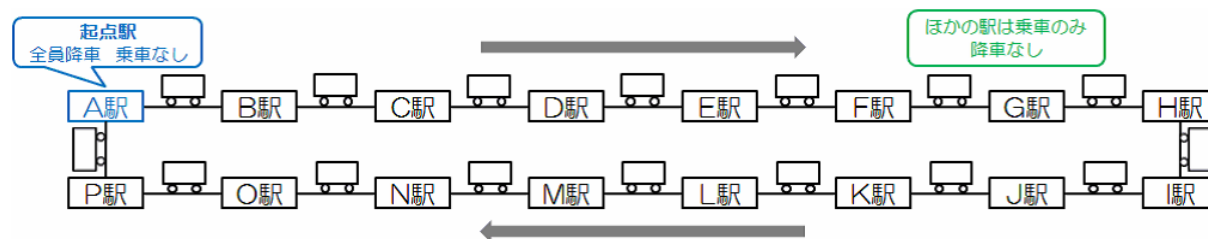


図 5: 環状線のイメージ

次に、列車が駅を出発して走行する際の挙動について説明する。列車は駅は駅に停車中、乗車処理を行う。単位時間当たり 11 人ずつ列車の乗車人数が増え、単位時間当たり 10 人ずつ駅にいる乗客は減っていく（乗車中にも新たな乗客が到着するため）駅の乗客数が 0 になり、かつその駅の発車時刻になれば乗車処理は完了とし、列車を発車させる。

環状線の場合は、最初の駅に戻ったとき全ての乗客が降車し、その駅の発車時刻になれば降車処理は完了とし、列車を発車させる。

発車した列車は定義した表定速度で進み、座標をプラスしていく。次の閉塞に進入するとき、次の閉塞に列車が存在するならば、列車をその場で停止させる。次の閉塞に列車が存在しない場合は、そのまま次の閉塞に進入する。

そして次の駅に到着したら、再び乗車処理を行い、発車する。一連の流れをフローチャートで示すと以下のとおりである。

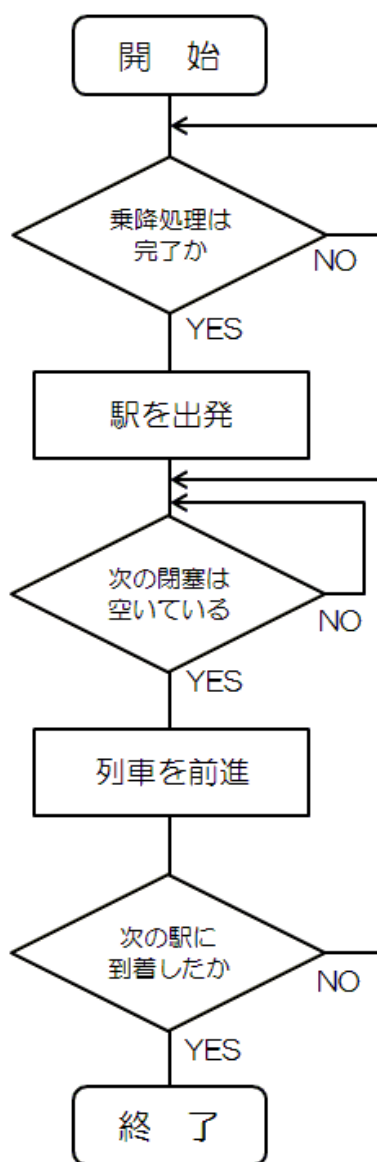


図 6: 列車が駅を出発して走行する処理のフローチャート



## 2.2 ダイヤの設定

ここでは、各列車の計画発着時刻の設定について説明する。図3から分かるとおり、駅を起点として次の駅の手前までには、閉塞の数は11個ある。1つの閉塞が長さ100m、列車の表定速度を単位時間当たり（1秒当たり）10mとしているので、1つの閉塞の通過に要する時間は10秒であり、駅を発車して次の駅に到着するのに要する時間は110秒である。1秒当たり人の乗客が駅に到着するので、列車が駅に到着した瞬間の駅にいる乗客人数は110人だが、乗車処理がその瞬間から行われるので、駅にいる乗客人数は100人となる。その後は1秒につき10人ずつ駅にいる乗客が減っていくので、10秒で全ての乗客の乗車が完了する。つまり、駅間走行時間110秒、駅停車時間10秒をこの路線の基本ダイヤとする。

このルールに従い各列車の各駅の計画発着時刻を2分間隔の場合と4分間隔の場合で設定すると以下ようになる（図中の時刻の表記は、“MMSS”（MMは分、SSは秒）である）

列車番号	1	2	3	...
A発	0000	0200	0400	
B着	0150	0350	0550	
B発	0200	0400	0600	
C着	0350	0550	0750	
C発	0400	0600	0800	
⋮				

図7: 各列車の各駅の計画発着時刻（2分間隔の場合）

列車番号	1	2	3	...
A発	0000	0400	0800	
B着	0150	0550	0950	
B発	0200	0600	1000	
C着	0350	0750	1150	
C発	0400	0800	1200	
⋮				

図8: 各列車の各駅の計画発着時刻（4分間隔の場合）

### 2.3 ダイアグラムについて

§2.2 で定義した 2 分間隔の放射線のダイヤのダイヤグラムを以下に示す．図 9 のような図をダイヤグラムという（ダイヤ図，運行図表という表現もあるが，本論文ではダイヤグラムという表現を用いる．）

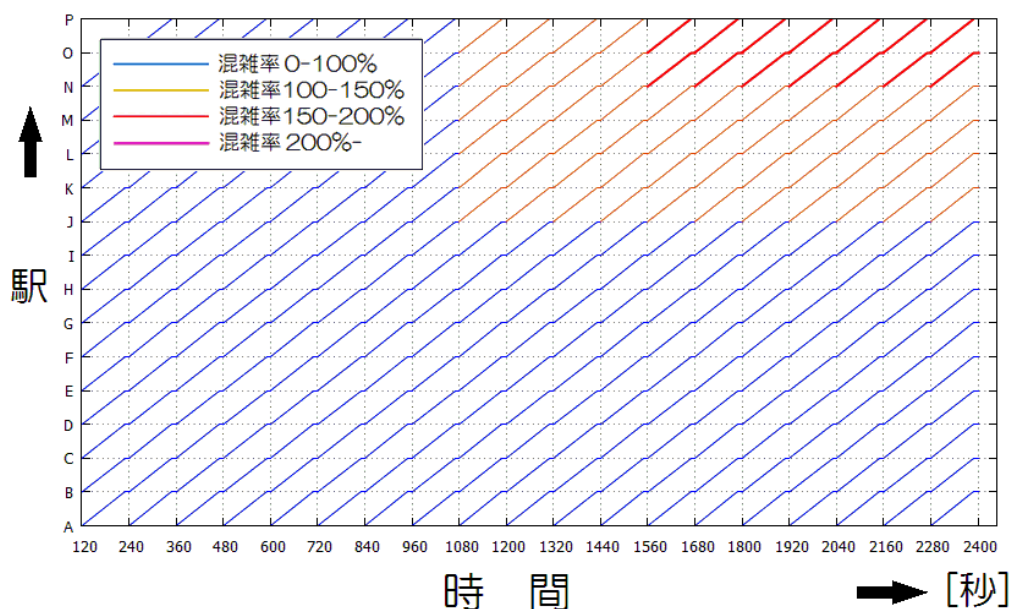


図 9: 2 分間隔の放射線のダイヤグラム

ダイヤグラムは，横軸に時間，縦軸に駅の位置を取り，各列車の位置をプロットして線で結ぶことにより，いつどの列車がどこを走っているのかを表現している．図 9 では，横軸の 1 目盛は 120 秒 (2 分) となっている．

また，実際に鉄道会社で利用されているダイヤグラムでは，列車の種別を線の色で識別しているが（例えば普通列車は黒色，快速列車は赤色という具合に），本論文では列車の混雑率を線の色と太さで識別して表現する．列車の混雑率が，0% 以上 100% 未満の場合は青色，100% 以上 150% 未満の場合は橙色，150% 以上 200% 未満の場合は赤色で太線，200% 以上の場合は桃色で太線とする．

例えば，時刻 120 秒のときに A 駅を出発した列車は，時刻 1080 のときに J 駅を出発しそこから混雑率が 100% を超え，時刻 1920 ごろに終点の P 駅に混雑率 150% 以上で到着したことが読み取れる．

参考までに，国土交通省鉄道局によれば，混雑率ごとの列車内の快適性について以下のように定義されている．

100% 定員乗車．座席に着くか，吊革に捕まるか，ドア付近の柱に捕まることができる．

150% 新聞が楽に読める．

180% 折りたたむなど無理をすれば新聞は読める．

200% 体が触れ合い相当圧迫感があるが，週刊誌程度なら何とか読める．

250% 電車が揺れるたびに体が斜めになって身動きがとせず，手も動かさない．

## 2.4 シミュレータの画面

作製したシミュレータの画面は以下のとおりである。

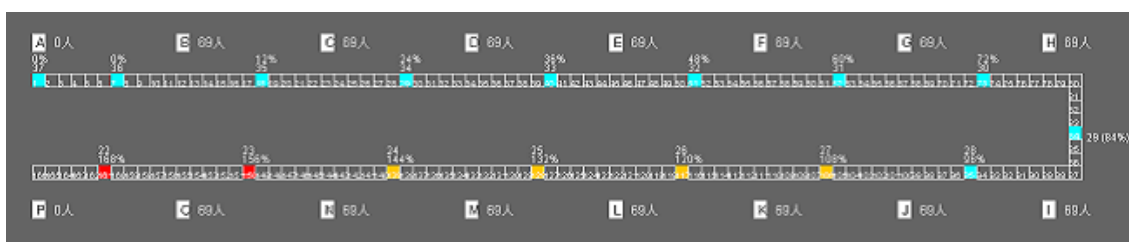


図 10: シミュレータの画面（放射線）

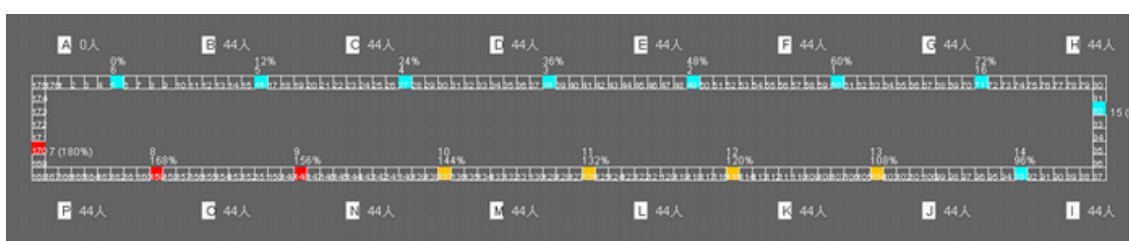


図 11: シミュレータの画面（環状線）

四角のマス目は路線（閉塞）であり，数字は閉塞の通し番号である．閉塞上の色のついた部分が列車の存在を示しており，列車の色は混雑率により色分けされており，混雑率 0%以上 100%未満の列車は青色，100%以上 150%未満の列車は黄色，150%以上 200%未満の列車は赤色，200%以上の列車はピンク色で表示される．各列車を識別する列車番号と混雑率も併せて表示される．

周りにある白い四角は駅を示しており，アルファベットは駅名を，横の数字は駅にいる乗客数を示している．

機能として，任意の列車を任意の時間だけ遅らせダイヤ乱れを発生させることや，ダイヤグラムの描画，§3 で述べる不満度の計算も可能である．

ダイヤ乱れを発生させる処理を示すフローチャートは以下のとおりである．

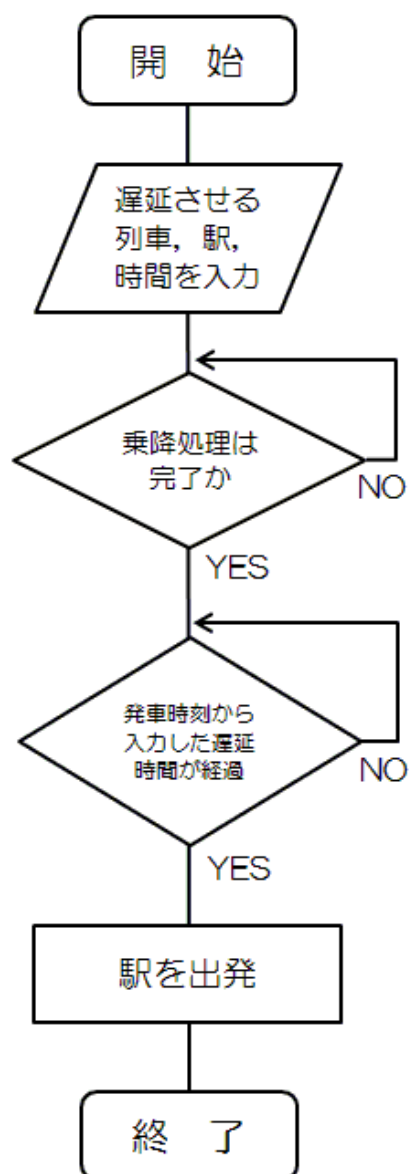


図 12: ダイヤ乱れを発生させる処理を示すフローチャート

### 3 利用者不満度関数の定義

効率的なダイヤ回復の手法を追究するには、ダイヤの良し悪しを関数を用いて数字で評価することが必要となる。この章では、鉄道路線のダイヤの良し悪しを利用者の不満度の総和で評価する、利用者不満度関数の定義を行う。

利用者の不満度を評価する関数は、既存の研究結果からいくつか提案されている。例えば、鉄道プロジェクトをより効果的で効率的なものとなるように策定された「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2012」[2]では、利用者の不効用値の計算方法について以下のように述べられている。

$$\begin{aligned} \text{不効用値} = & \text{列車乗車時間 (秒)} + 2 \times \text{ホーム待ち時間 (秒)} + \\ & 600 \times \text{乗換回数} + (\text{駅間走行時間 (秒)} \times \text{混雑度式}) \end{aligned} \quad (1)$$

混雑度式（「混雑率」は定員に対する乗車人員の倍率）

- 混雑率 0 ~ 100% のとき： $F=0.027 \times (\text{混雑度})$
- 混雑率 100 ~ 150% のとき： $F=0.0828 \times (\text{混雑度}) - 0.0558$
- 混雑率 150 ~ 200% のとき： $F=0.179 \times (\text{混雑度}) - 0.2$
- 混雑率 200 ~ 250% のとき： $F=0.69 \times (\text{混雑度}) - 1.22$
- 混雑率 250% 以上のとき： $F=1.15 \times (\text{混雑度}) - 2.37$

この式は、(1) 利用者の不効用値を列車の乗車時間と考え、さらに待ち時間、乗り換え回数、車内の混み具合を、列車の乗車時間に換算した値を加算したものである。つまり、ホームでの待ち時間は列車乗車時間の倍に相当する不効用が、1回の乗り換えは列車乗車時間 600 秒に相当する不効用が感じられるということである。この式を用いれば、乗り換えやホームでの待ち時間といった、鉄道利用における一連の動作を考慮したダイヤの評価が可能である。

しかし、式 (1) を用いて不効用の計算を行うには、乗客が鉄道の利用を開始して（乗車駅に到着して）から終了するまで（降車駅に到着するまで）の流れを全て終えてからでなければ計算ができず、事故などでダイヤが乱れたときの回復過程における不効用値の変化を確認するのは困難である。また、車内の混雑度を乗車時間に換算する混雑度式も既存の関連研究より算出された値ではあるが、数値が難解でありイメージが掴みにくい点や、乗り換えは対面で乗り換えが可能な場合もあれば階段の上り下りが必要な場合があるにもかかわらず一律に 600 秒の乗車時間相当としており無理があると感じられる点がある。

そこで本研究では、時間ごとの変化を表現し、かつ直感的にイメージしやすく分かりやすいダイヤの評価手法を以下のように提案する。

まず鉄道路線の乗客を、列車内の乗客と駅にいる乗客に分ける。

列車内の乗客は、列車が遅れれば不満を感じるわけであるから、列車内の乗客数にその列車の遅れ時分を乗じることにより、その列車内の乗客全員の時間の損失を計算する。また、列車が空いているときと混雑しているときでは、混雑しているほうが遅れに対して感じる不満はより大きくなると考えられることから、先ほど計算した乗客全員の時間の損失にその列車の混雑度をさらに乗じ、その列車内の乗客の不満度とする。

次に、駅にいる乗客は、列車が到着しないことに対して不満を感じるわけであるから、駅にいる乗客数に、次に到着する列車の平常時との時間差（例えば通常は前の列車が出発して2分後に次の列車が到着するのに3分間列車が到着していないときは、1分となる）を乗じ、その駅の乗客の不満度とする。列車と駅は複数あるわけだから、全ての列車と駅ごとに同様の計算を行い総和を計算することで、その鉄道路線を利用する全乗客の不満度とする。

以上をまとめると、

利用者の不満度を表す関数  $U(t)$  を、時刻  $t$  を変数として、

$$U(t) = \sum_i T_i(t) + \sum_j S_j(t)$$

$T_i$  = 各列車の乗客の不満度 = 列車  $i$  の乗客数 × 列車  $i$  の遅れ (分) × 列車  $i$  の混雑率

$S_j$  = 各駅の乗客の不満度 = 駅  $j$  の乗客数 × 駅  $j$  の次に到着する列車の平常時との時間差 (分)

となり、この式を利用者不満度関数と呼ぶことにする。なお、 $t$  は最初に遅延した列車がその駅を出発した瞬間を原点とする。

例として、2分間隔の放射線においてとある列車をB駅で60秒遅延させ、路線全体の乗客の不満度を1分ごとに記録した結果を以下に示す。この曲線を、不満度曲線と呼ぶことにする。

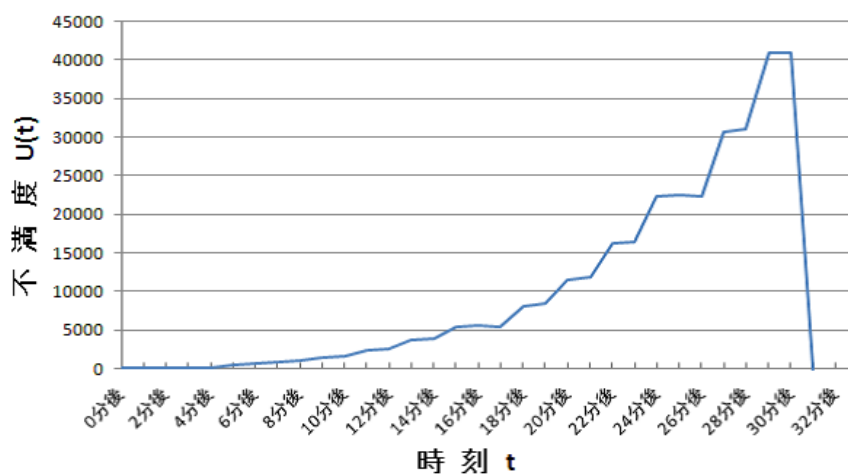


図 13: 不満度曲線の例

平常時は不満度は0で、遅延が発生するとグラフが右肩上がりに上がっていく。32分後に遅延している列車が全て終点まで到達し、不満度は0に戻るという具合である。そしてこのときの列車の運行の様子をダイヤグラムにしたものが図14である。図13の原点となる時刻  $t$  は、図14の  $t = 300$  に相当する（本来なら  $t = 240$  に出発する列車が60秒遅れて出発したため。）

また、今後の説明の便宜を考えて、各モデルを以下のように命名する。モデル名は  $\square$  で括って表記することにする。

放射線の2分間隔ダイヤ [放射線 2分間隔]

放射線の4分間隔ダイヤ [放射線 4分間隔]

環状線の2分間隔ダイヤ [環状線 2分間隔]

環状線の4分間隔ダイヤ [環状線 4分間隔]

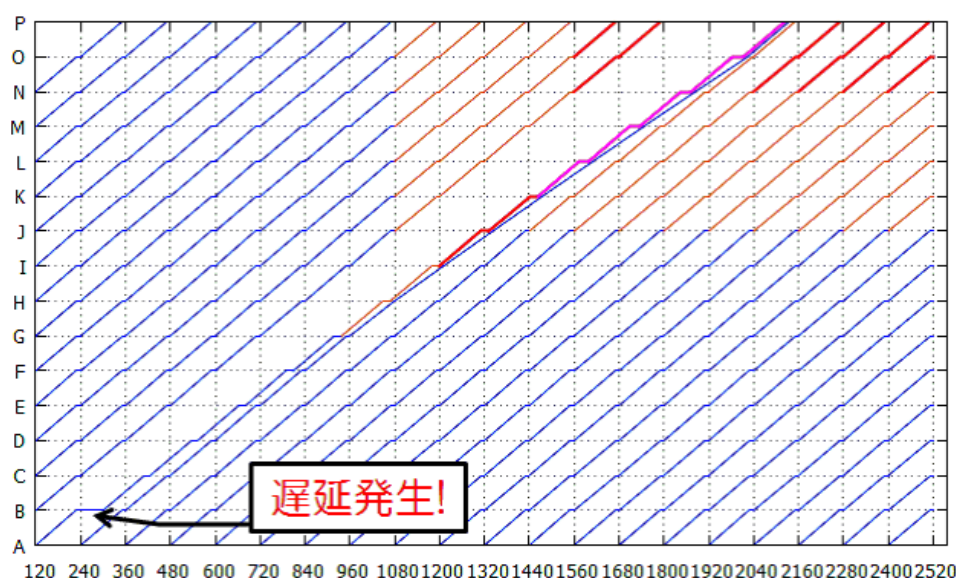


図 14: [放射線 2 分間隔] B 駅で 60 秒遅れ

さらにほかの研究事例として、「列車ダイヤに対する顧客満足度の予測」[3]では、利用者が鉄道ダイヤを評価する要素として、列車本数、正確さ、混雑度、速さを挙げ、それらの要素に重みづけをし総和を計算する式が提案されている。

式 1  $X_1$ : 列車本数因子満足度

$$X_1 = 2.647 - 0.084 \times \text{ホーム待ち時間 (分)} + 0.069 \times \text{乗車駅の列車本数 (本/30 分)} \\ + 0.095 \times \text{乗車駅の列車本数の路線・時間帯平均 (本/30 分)} + 0.539 \times \text{昼かどうか} \\ + 0.016 \times \text{年齢 (歳)}$$

$X_2$ : 正確さ因子満足度

$$X_2 = 4.385 - 1.513 \times \text{遅れ頻度} - 1.134 \times \text{遅れ頻度の路線・時間帯平均} + 0.132 \\ \times \text{昼かどうか} + 0.011 \times \text{年齢 (歳)}$$

$X_3$ : 混雑度因子満足度

$$X_3 = 4.607 - 0.007 \times \text{混雑率 (\%)} + 0.831 \times \text{着席可能性} - 0.003 \\ \times \text{混雑率の路線・時間帯平均 (\%)} + 0.004 \times \text{年齢 (歳)}$$

$X_4$ : 速さ因子満足度

$$X_4 = 3.868 + 0.275 \times (\text{移動距離 (km)} \div \text{所要時間 (分)}) - 0.012 \times \text{所要時間 (分)} \\ + 0.433 \times \text{昼かどうか} + 0.012 \times \text{年齢 (歳)}$$

$$\text{式 2 ダイヤの総合満足度} = -0.369 + 0.557X_1 + 0.205X_2 + 0.172X_3 + 0.132X_4$$

昼かどうかは「昼=1, 朝=0」を、遅れ頻度は「よく遅れる=1, 遅れることはあまりない=0」を、着席可能性は「着席できる状態=1, 着席できない状態=0」を投入する。

乗客の不満度を計算する処理を示すフローチャートは以下のとおりである。

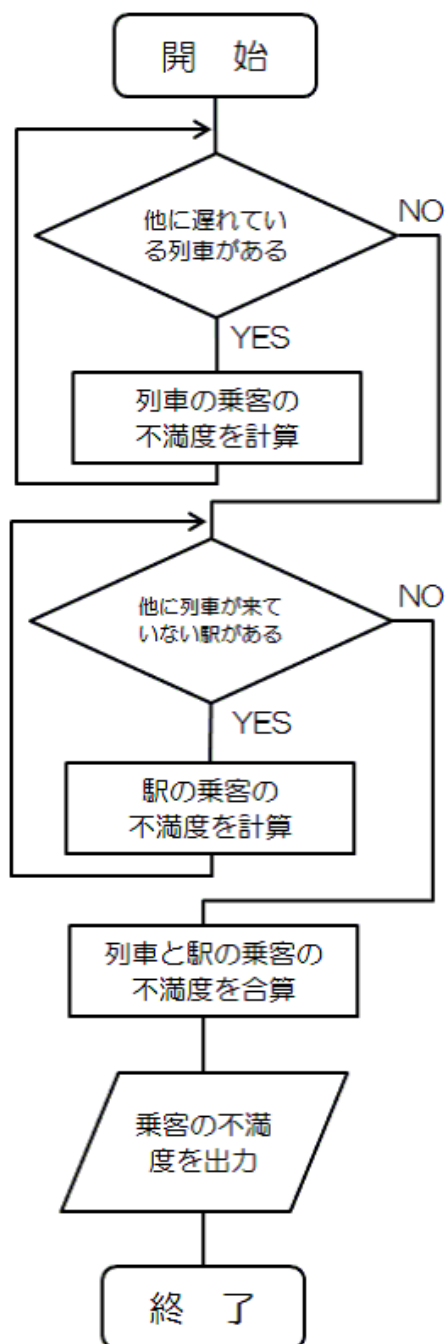


図 15: 乗客の不満度を計算する処理を示すフローチャート



## 4 寺田寅彦の市電モデル

この章では、随筆家で物理学者でもある寺田寅彦が考えた列車の混雑具合に関する法則性について述べる。

### 4.1 寺田寅彦の市電モデルとは

[4]の中に、「電車の混雑について」という話題がある。寺田寅彦が東京都内の市電を観察していて発見した市電の混雑具合の法則性について書かれている。本研究で作製したシミュレータでもこの法則性を再現することが可能である。まずはその法則性について簡単に説明する。

寺田寅彦は市電を観察していると、前の列車が過ぎてから長い間隔を置いて非常に混雑した列車が過ぎ去り、すぐ後ろを空いている列車が後を追うように続いていて、さらに長い間隔を置いて混雑した列車と空いている列車が団子になって走る法則に気が付いた。図 16 のようなイメージである。



図 16: 寺田寅彦が気付いた市電の法則性

[4]の中では、このような現象が起こる理由について以下のように考察している。

走行している各列車を前から順に  $\dots T_{i-1}, T_i, T_{i+1} \dots$  と区別し、各停留所に単位時間あたりに来る乗客の人数を  $n$  とする。

ここで、何らかの理由により、 $T_i$  列車が  $D$  だけ停留所を遅れて発車したとする。すると、 $T_i$  列車が次の停留所で収容すべき乗客数は  $nD$  だけ増えるので、停留所の発車がさらに遅れ、混雑が増す。同様にさらに次の停留所の発車もさらに遅れ、混雑が増す。列車同士の間隔が開くと、最初の遅れてる列車に乗客が集中するわけである。つまり、「一度遅れた列車は遅れと混雑がますます増加する」ということがいえる。

一方で、後ろを走る  $T_{i-1}$  列車は、 $T_i$  列車が  $D$  だけ停留所を遅れて発車してくれているので、収容すべき乗客数は  $nD$  だけ少なくて済む。その結果、停留所を早く出発することが可能であり、前を走る  $T_i$  列車との距離が次第に縮んでいくことになる。

さらに後ろを走る  $T_{i-2}$  列車は、前を走る  $T_{i-1}$  列車が停留所を早く出発したのために、通常より多くの乗客を収容する必要があり、遅れていく。これらの現象が後ろへと波及していき、結果的に図 16 のような現象が起こる。

### 4.2 寺田モデルの再現

§4.1 で述べた話をシミュレータで再現してみる。寺田寅彦が考えたこのモデルでは、列車は通常よりも早く出発することが有り得る（路線バスが乗客のいない停留場を通過するイメージである）ので、シミュレータ内でも各駅での発車時刻を設定せず、駅にいる乗客の乗車が完了次第列車を出発させるという設定でシミュレーションを行っている。

[放射線 2 分間隔] にてとある列車を B 駅で 30 秒遅らせて発車させシミュレーションを行った結果が図 17 である。N 駅付近と P 駅付近で列車が数珠つなぎになっているのが分かる。

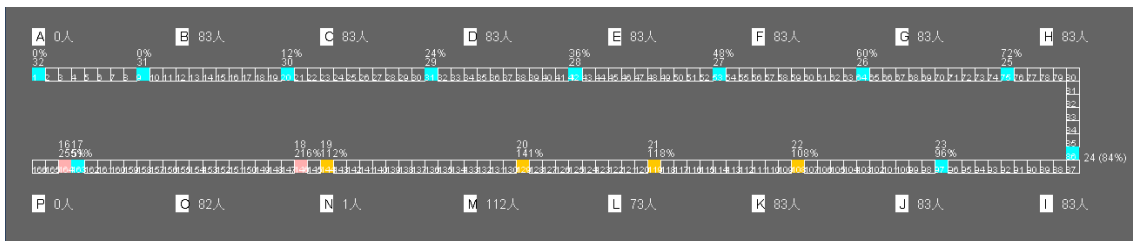


図 17: 寺田寅彦モデルの再現

また、そのときのダイヤグラムが図 18 である。

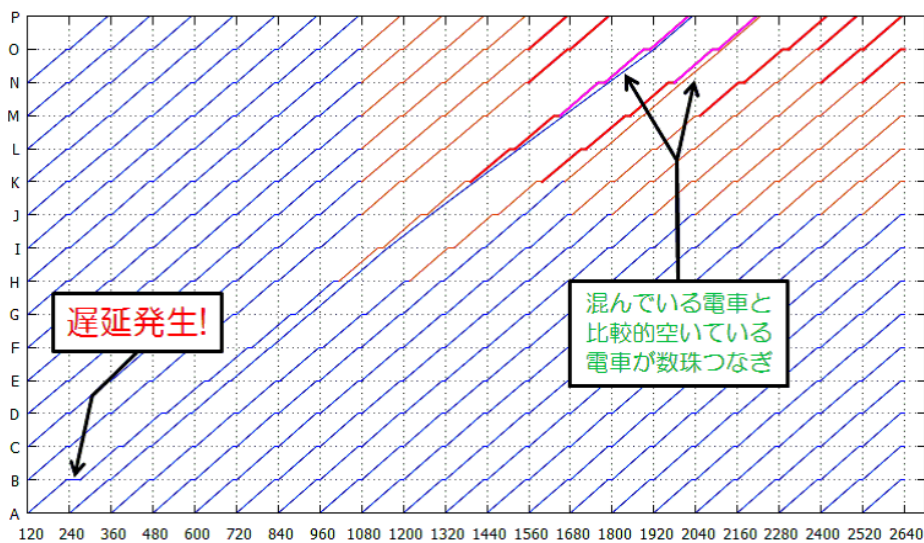


図 18: [放射線 2 分間隔] 寺田寅彦の市電モデルのダイヤグラム

2 台の列車が数珠つなぎになって走行しているところが 2 か所ある．数珠つなぎの先頭になっている列車は、他の列車と比べると混雑率の増加が大きいことが分かる．そしてその後ろに続く列車は、他の列車と比べると混雑率の増加が小さい．また、通常であれば 2 分間隔で列車が走行しているが、数珠つなぎになっている列車の前後は間隔が 3～4 分程度に開いており、寺田寅彦が考察した図 17 のような状況になっていることが分かる．

### 4.3 寺田モデルが成立する条件

具体的に列車がどの程度遅れたら寺田寅彦が考えた現象が起こるのかを考えてみる．図 19 に示すように、最初に遅れが発生した列車を  $T_i$  列車とし、その前を走る列車を  $T_{i-1}, T_{i-2}, \dots$ 、後ろを走る列車を  $T_{i+1}, T_{i+2}, \dots$  とし、平常時における列車同士の時間差を  $L$  とする．

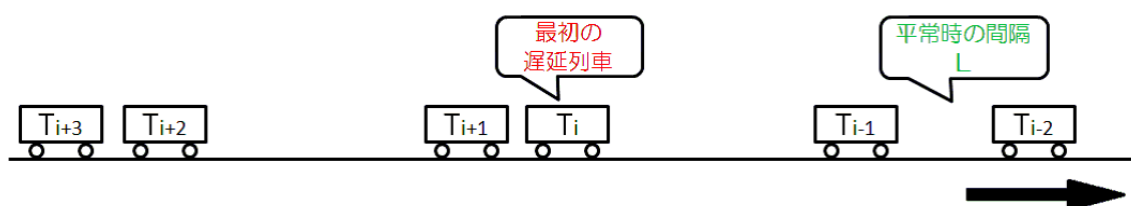


図 19: 各列車の位置関係

そして  $T_i$  列車が終点の駅に到着する寸前に、以下に示す条件が全て満たされているとき、寺田モデルが成立しているとみなすことにする。

1.  $T_i$  列車が終点に到着する寸前、 $T_i$  列車と  $T_{i+1}$  列車の時間差が  $0.5L$  以下。
2.  $T_{i+1}$  列車が終点に到着する寸前、 $T_{i+1}$  列車と  $T_{i+2}$  列車の時間差が  $L$  以上。
3.  $T_{i+2}$  列車が終点に到着する寸前、 $T_{i+2}$  列車と  $T_{i+3}$  列車の時間差が  $0.5L$  以下。
4.  $T_i$  列車が終点に到着する寸前、 $T_i$  列車の混雑率は  $T_{i+1}$  列車よりも大きい。
5.  $T_{i+2}$  列車が終点に到着する寸前、 $T_{i+2}$  列車の混雑率は  $T_{i+3}$  列車よりも大きい。

とある列車が B 駅で遅れるとして、何秒遅れれば寺田モデルが成立するのか検証した。その結果、列車の遅れが 10 秒以上 43 秒以下であれば、上で示した条件が全て成立することが確認できた。

遅れが 9 秒以下であると 3 の条件が成立しなかった。また、遅れが 44 秒以上であると、2 の条件が成立しなかった。遅れが大きすぎると、 $k$  列車に後続の列車が近づいてくるばかりであり、図 16 のような周期的な列車の並びにはならなかった。

§4.1 でも考察したが、計算上は遅れが 1 秒でもあり、路線の長さが無限に続くとすれば、寺田モデルは成立する。しかし今回は路線の長さに限りがあるので、遅れがある程度大きくないと、寺田モデルはしない結果となった。

## 5 運転整理について

この章では、ダイヤが乱れたときに正常なダイヤに戻す試みである運転整理について説明する。

### 5.1 運転整理の手法

一口に運転整理といっても、様々な手法がある。例えば、表1のような手法が挙げられる。

表 1: 運転整理の手法 (出典):[1] 138 ページ

名称	内容
運休	列車の運転を取りやめる(部内用語で「ウヤ」という)
部分運休	列車の一部区間の運転を取りやめる
臨時列車	臨時列車を運転する(「リン」を立てるという)
延長運転	列車の運転区間を延長する
車両運用変更	車両の使用計画を変更する
番線変更	駅での列車の番線を変更する
発順序変更	列車の出発順序を変更する(退避の設定, 退避の解除)
着順序変更	列車の到着順序を変更する(合流駅で)
停車種別変更	通過を停車に変更する
発時刻変更	列車の発時刻を変更する(間隔調整等)
列車種別変更	列車の種別を変更する(快速列車を普通列車に変更する, 営業列車を回送列車に変更するなど)
運転路線変更	列車を運転する路線を変更する(特に, 複々線)

上で挙げた手法をどれでも簡単に使えるのならば、どんなにダイヤが乱れても回復させることは容易であろう。しかし、実際はそうはいかず、様々な制約条件が付きまとう。例えば列車を運休したとしても、その運休した列車を引き上げ線等に移動させなければ、後続の列車が駅に到着できなくなってしまう。臨時列車を出すにしても、車庫に予備の車両が余っている必要があり、かつ列車を運転する乗務員を確保しなければならない。列車の種別を変更する際でも、例えば快速列車と普通列車で両数が異なるのならば、ホームの長さが足りなくて停車できないという問題も発生し得る。

他にも運転整理には様々な制約条件があるが、その中でも制約がほぼ少なく実行できるのが、列車の発車時刻を変更し、前後の列車との間隔を調整すること(表1中の発時刻変更)であり、本研究でもその手法を主な運転整理の手段として扱っていく(以下、本論文の中では時間調整と呼ぶことにする。)

### 5.2 時間調整とは

時間調整は、例えば車内での急病人の発生や乗客同士のトラブル、近隣の施設でのイベント等による一時的な乗客の集中による遅延といった、小規模なダイヤ乱れの際に有効である。4でも触れたとおり、一度遅れた列車は遅れと混雑がさらに増加していく。これを防ぐために、遅れている列車の前後を走る列車を意図的に遅らせ、列車同士の間隔をできるだけ均一に保ち、列車の遅れの増加を最小限に抑える。時間調整のイメージを図20に示す。

他の運転整理の手法については、[1]、[5]で詳しく解説されている。

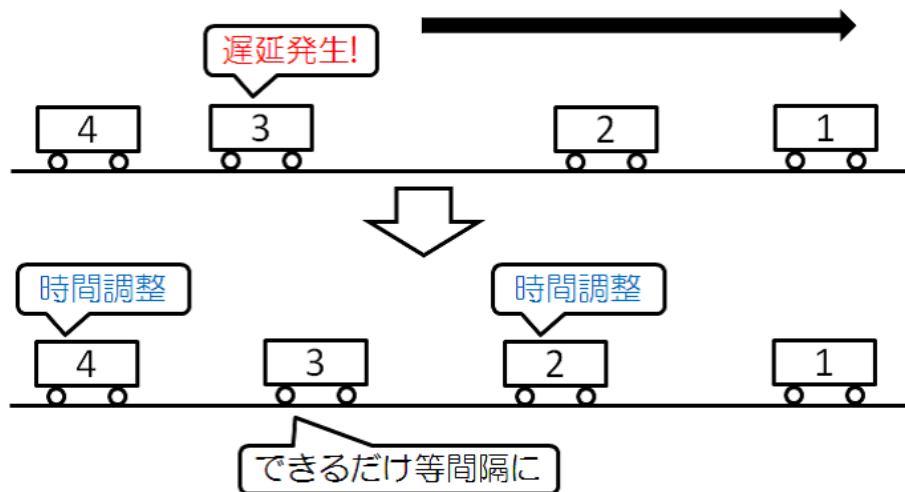


図 20: 時間調整のイメージ

### 5.3 時間調整を行ったとき

時間調整を行ったとき、各列車はどのような動きをするのかを確認してみる。[放射線 2 分間隔]にてとある列車を B 駅にて 60 秒遅らせ、時間調整を行わなかった場合と行った場合のダイヤグラムと不満度曲線を以下に示す。(§3 の図 14 の再掲)

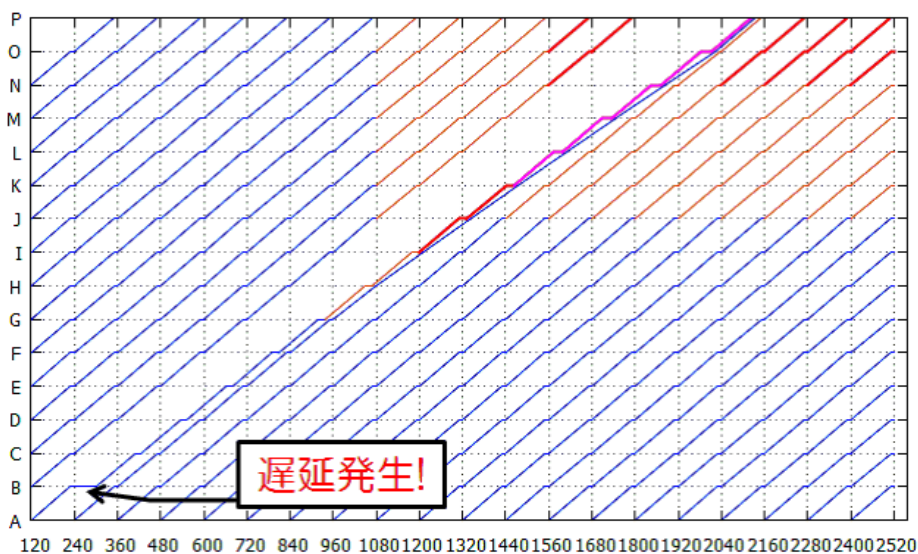


図 21: [放射線 2 分間隔] B 駅で 60 秒遅れ 時間調整なし

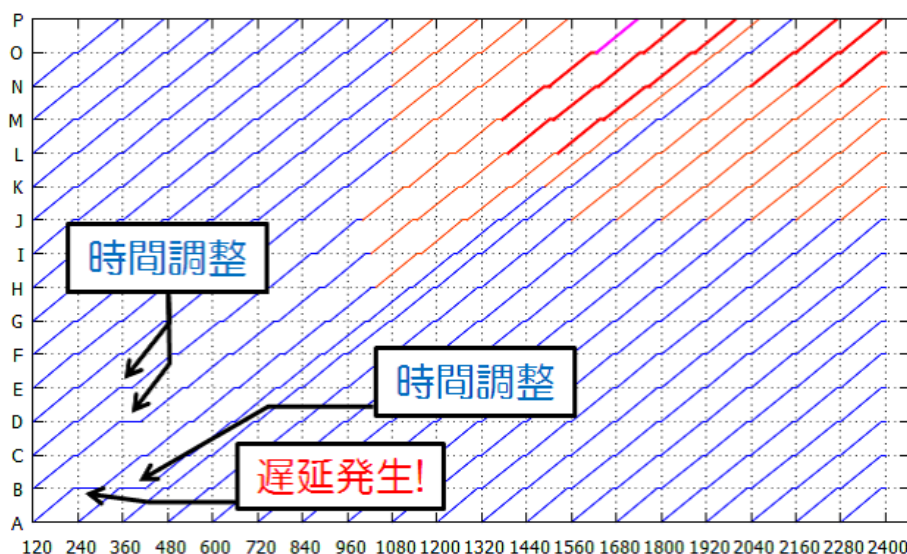


図 22: [放射線 2 分間隔] B 駅で 60 秒遅れ 前の列車 2 台と後ろの列車 1 台を時間調整

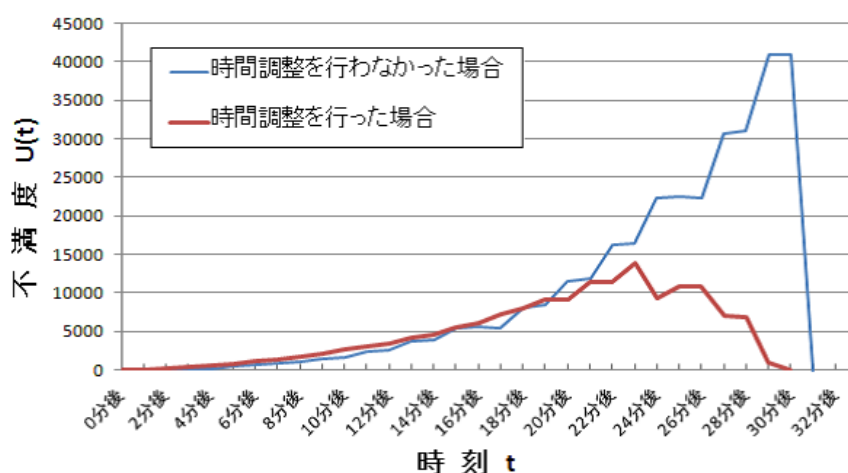


図 23: [放射線 2 分間隔] 不満度曲線の比較 (図 21 と図 21 の比較)

時間調整を行わない場合だと、最初に遅れた列車が終点の駅に到着する前の時点で列車が 3 台数珠つなぎになっている。しかし遅れが発生したときにすぐに時間調整を行うと、その後は各列車同士の間隔が維持できていることが分かる。

また、最初に B 駅で 60 秒遅れた列車は、時間調整を行わない場合だと、終点の駅に到着するときには遅れが 3 分程度に延びているが、時間調整を行った場合だと、遅れは 2 分程度で済んでいる。時間調整を行うことにより、遅れの増大を抑えることが可能となる。

不満度曲線についても、時間調整を行った時の不満度のピークは行わなかったときと比べて半分以下で済んでおり、時間調整により乗客の不満が大幅に軽減されていることが分かる。最適な不満度を最善にする時間調整の手法については、§6 で詳しく述べる。

#### 5.4 どの列車を時間調整すべきか

§5.2 では、時間調整とは遅れた列車の前後を走る列車を意図的に遅らせることで列車の間隔を保つことであると述べた。ここで、遅れた列車の前を走る列車と後ろを走る列車では、意図的に遅らせる目的が異なることについて説明しておきたい。

まず、前を走る列車を遅らせるのは、列車同士の間隔を一定に保つためであり、かつ列車の遅れの増加を最小限に抑えるためである。列車が駅で何秒遅れて発車するのかは、前を走る列車との間隔の開き具合に依存する。そのため、時間調整を行わなければ、一度遅れた列車の遅れは斜面を傾がる雪だるまのように増加していくが、時間調整を行うことにより、遅れの増加を抑えることができるのである。

しかし、後ろを走る列車を遅らせるのは、目的が変わってくる。先ほども述べたが、列車が駅で何秒遅れて発車するのかは、前を走る列車の位置に依存するので、後ろの列車がどこを走っているかが関係ない。とある列車の後ろを走る列車がゼロであっても、その列車の遅れに影響を及ぼすことは無い。そのため、後ろを走る列車を時間調整するのは、前を走る遅れている列車に追いついて列車が数珠つなぎになってしまうのを防ぐためではない。

そしてここで確認しておきたいのが、列車同士が数珠つなぎになってしまうこと自体は決して問題ではないということである。時間調整を行うのが遅れた列車の前を走る列車だけであったとすると、後ろを走る列車が次第に追いついて数珠つなぎになっていくだろう。しかし、数珠つなぎになったとしても、後ろを走る列車だけに着目すれば、列車同士の間隔は平常通りの間隔以内には収まっているわけである。乗客からすれば列車は平常通りあるいはそれ以内の間隔で到着すれば文句は無いわけであるから、そういう意味では後ろを走る列車を時間調整する必要性はあまり無いように思える。

だが実際の鉄道路線では、遅れた列車の後ろを走る列車も時間調整を行っている。それは列車の機外停止を防ぐためであると考えられる。機外停止とは、列車が駅と駅の間で停止することをいう。小規模なダイヤ乱れであれば、機外停止の時間は数十秒、長くても数分程度であるから特に問題は無い。しかし、人身事故や車両故障といった大きなトラブルだと、機外停止の時間が1時間、長くても2時間や3時間にもなってしまうことも珍しくはない。ラッシュ時の混雑した列車内に長時間閉じ込められればどうなるかは容易に想像できる。よくニュース番組において、「列車が駅間に 時間立ち往生し、乗客 名が体調不良を訴え病院に搬送された」という報道を耳にする。駅に停止している列車はドアが開くのでホームに降りることが可能だが、機外停止の場合だとこのような問題が発生するのである。しかし後ろの列車を時間調整することにより、列車同士が極端に接近しないようにしておくことで、機外停止のリスクを抑えることができる。

話を最初に戻すと、要するに前の列車を時間調整するのは列車同士の間隔を保ち遅れの増加を防ぐため、後ろの列車を時間調整するのは機外停止を防ぐため、ということである。本研究では、ダイヤの良し悪しを評価する式として、§3 に示した式を用いている。列車内の乗客の不満度は列車がどれだけ遅れているかによって決定するとしているため、後ろを走る列車を時間調整することは乗客の不満度の緩和には繋がらず、かえって不満度を余計に増加させるだけである。また、先ほども述べたとおり、後ろを走る列車はどれだけ数珠つなぎになっていようが列車同士の間隔は平常時以下であることが分かっているので、駅にいる乗客の不満度の緩和にも繋がらない。よって本研究では、時間調整を行うのは初めに遅れた列車の前を走る列車に限定して議論を行うことにする。

§5.3 では前後の列車を時間調整した場合のダイヤグラムと不満度曲線を示したが、ここでは列車を B 駅で 60 秒遅らせ、前の列車のみ時間調整した場合のダイヤグラムと不満度曲線を示しておく。

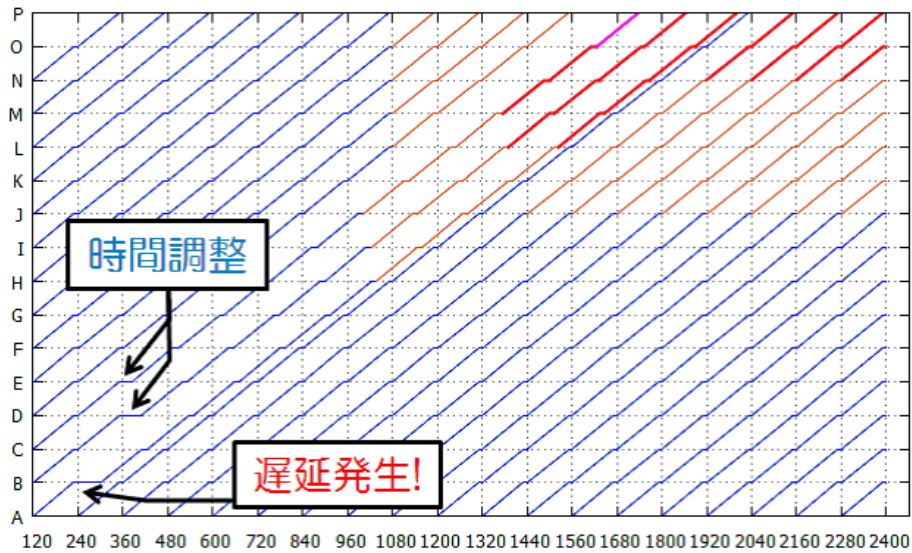


図 24: [放射線 2 分間隔] B 駅で 60 秒遅れ 前の列車 2 台を時間調整

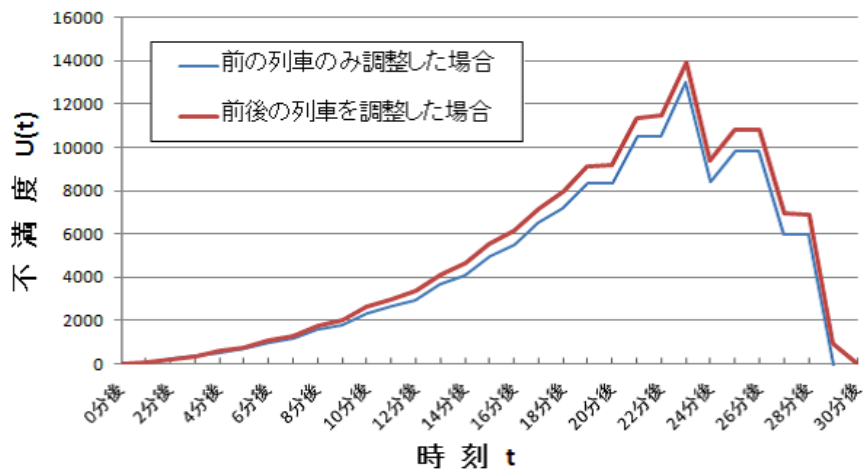


図 25: [放射線 2 分間隔] 不満度曲線の比較 (図 22 と図 24 の比較)

後ろの列車は時間調整をする必要性が無いので、前の列車のみ時間調整を行うと、不満度がさらに軽減されていることが分かる。



### 5.5 時間調整の最適解の探し方

本研究では、鉄道路線のダイヤは、放射線の2分間隔ダイヤと4分間隔ダイヤ、及び環状線の2分間隔ダイヤと4分間隔ダイヤの4種類を取り扱っている。そして時間調整の手法として、遅れた列車の前を走る列車を1台調整する場合、2台調整する場合、3台調整する場合を考える。調整する量は、初めにB駅で列車を $D$ だけ遅らせ、前を走る各列車を $0.1D, 0.2D, \dots, 1.0D$ という具合に、10通りの調整量を考える。すなわち1台調整する場合は10通り、2台調整する場合は100通り、3台調整する場合は1000通りのパターンが考えられるということである。

しかし、10通りや1000通りというパターンの中には無駄な組み合わせも含まれている。初めに $T_i$ 列車が $D$ だけ遅れ、1台前の列車の調整量を $T_{i-1}D$ 、2台前の列車の調整量を $T_{i-2}D$ 、3台前の列車の調整量を $T_{i-3}D$ とすると、

$$T_{i-1}D \geq T_{i-2}D \geq T_{i-3}D$$

という関係は常に成立するものとして議論を進める。時間調整は列車同士の間隔を均一に保つために行うが、この関係が逆であると、 $T_{i-3}$ 列車に $T_{i-2}$ 列車が接近し、 $T_{i-2}$ 列車に $T_{i-1}$ 列車が接近し、列車同士が数珠つなぎになってしまうのを助長してしまうだけである。以上を踏まえると、2台調整する場合のパターンは半分の約50通り、3台調整する場合のパターンも約500通りにまで絞り込むことができる。

## 6 最適な運転整理案の追究

この章では、放射線と環状線における最適な時間調整の手法について述べる。

### 6.1 放射線の場合

#### 6.1.1 放射線の2分間隔ダイヤ

とある列車をB駅で遅らせ、遅れの量は30秒、40秒、50秒…と10秒刻みに、最大90秒までとする。それぞれの場合で1台調整、2台調整、3台調整の場合における乗客の不満度を最小にするパターンを分析する。

ここで、不満度曲線を評価するのに以下の3つの評価尺度を考える。

不満度の合計

グラフを $t = 0$ から不満度 $U(t)$ が再びゼロに戻るまでを積分した総和がどれだけ小さくて済むか。

不満度のピーク

不満度のピークの値がどれだけ小さくて済むか。

不満度がゼロになる早さ

不満度がゼロに戻るまでにかかった時間がどれだけ短いか。

初めの列車の遅れを $D$ とし、各評価尺度が最善になる利用者不満度関数の値と時間調整のパターンを算出した結果を以下に示す。

表 2: [放射線 2 分間隔] の分析結果 (赤字は調整台数を増やすことにより値が悪化したことを示す)

遅れD(秒)		調整なし	1台調整	2台調整	3台調整
30	不満度の合計値	92,761	56,771	56,488	57,525
	調整パターン	-	0.4D	0.8D, 0.2D	0.8D, 0.4D, 0.1D
	不満度のピーク値	11,988	5,916	5,347	4,637
	調整パターン	-	0.4D	0.5D, 0.1D	0.8D, 0.4D, 0.1D
	ゼロになる早さ(分)	31	29	29	29
	調整パターン	-	0.7D	0.8D, 0.1D	0.8D, 0.1D, 0.1D
40	不満度の合計値	146,757	83,366	78,842	83,275
	調整パターン	-	0.6D	0.6D, 0.2D	0.6D, 0.3D, 0.1D
	不満度のピーク値	19,507	8,812	7,023	6,782
	調整パターン	-	0.4D	0.6D, 0.2D	0.6D, 0.3D, 0.1D
	ゼロになる早さ(分)	31	29	29	29
	調整パターン	-	0.7D	0.8D, 0.1D	0.8D, 0.1D, 0.1D
50	不満度の合計値	206,222	113,326	105,821	108,652
	調整パターン	-	0.5D	0.7D, 0.3D	0.9D, 0.4D, 0.1D
	不満度のピーク値	29,124	12,079	9,735	8,683
	調整パターン	-	0.5D	0.7D, 0.3D	0.7D, 0.4D, 0.2D
	ゼロになる早さ(分)	32	29	29	29
	調整パターン	-	0.7D	0.8D, 0.1D	0.8D, 0.1D, 0.1D
60	不満度の合計値	318,696	146,617	137,018	139,200
	調整パターン	-	0.6D	0.6D, 0.2D	0.9D, 0.4D, 0.12D
	不満度のピーク値	40,976	16,174	12,106	11,256
	調整パターン	-	0.5D	0.6D, 0.2D	0.8D, 0.5D, 0.2D
	ゼロになる早さ(分)	32	29	29	29
	調整パターン	-	0.7D	0.8D, 0.1D	0.8D, 0.1D, 0.1D
70	不満度の合計値	429,435	187,838	166,999	168,810
	調整パターン	-	0.6D	0.9D, 0.4D	0.9D, 0.4D, 0.1D
	不満度のピーク値	57,457	21,061	15,402	13,841
	調整パターン	-	0.5D	0.7D, 0.2D	0.7D, 0.4D, 0.2D
	ゼロになる早さ(分)	33	29	29	29
	調整パターン	-	0.7D	0.8D, 0.1D	0.8D, 0.1D, 0.1D
80	不満度の合計値	601,433	224,793	204,242	203,338
	調整パターン	-	0.6D	0.9D, 0.4D	1.0D, 0.5D, 0.1D
	不満度のピーク値	75,253	24,835	18,535	16,757
	調整パターン	-	0.5D	0.9D, 0.4D	0.8D, 0.4D, 0.2D
	ゼロになる早さ(分)	33	29	29	29
	調整パターン	-	0.7D	0.8D, 0.1D	0.8D, 0.1D, 0.1D
90	不満度の合計値	735,691	273,571	239,487	239,257
	調整パターン	-	0.6D	0.9D, 0.3D	0.9D, 0.4D, 0.1D
	不満度のピーク値	95,340	30,638	21,312	19,532
	調整パターン	-	0.5D	0.6D, 0.3D	0.8D, 0.5D, 0.2D
	ゼロになる早さ(分)	33	30	29	29
	調整パターン	-	0.6D	0.8D, 0.1D	0.8D, 0.1D, 0.1D

時間調整によって各評価尺度がどの程度改善されたかであるが、1台調整するだけでも、各評価尺度の値は、調整しない場合と比べて劇的に改善していることが分かる。

次に2台調整した場合だと、1台調整した場合と比べると、不満度がゼロになるのにかかる時間は、遅れが90秒のときに1分改善しただけで、それ以外の場合では改善は見られなかった。また、不満度の合計値とピーク値はさらに改善しているが、調整なしから1台調整への変化ほど大きくは無い。

不満度の合計値とピーク値がどの程度改善しているか見てみると、遅れが30秒の場合で、1台調整した場合の不満度の合計値は、調整しない場合と比べて約38%、ピーク値は約50%改善している。遅れが60秒のときは、不満度の合計値は約54%、ピーク値は約60%、遅れが90秒のときは、不満度の合計値は約63%、ピーク値は約67%改善しており、遅れが大きければ大きいほど時間調整による改善の効果が大きい傾向にある。また、2台調整した場合でも、1台調整した場合と比べて、遅れが大きいほど改善の効果が大きいことが分かる。

次に3台調整した場合だと、不満度がゼロになるのにかかる時間は、2台調整した場合と比べて改善は見られなかった。不満度のピーク値は、改善幅こそ小さいが、値は小さくなっている。

一方で、不満度の合計値については、遅れが30~70秒の場合は2台調整した場合よりも値が大きく、悪化してしまった。遅れが80、90秒のときは改善しているが、改善幅はわずか0.5%以下であり、誤差と判断しても差し支えないほどである。

このような結果になってしまう原因としては、多くの列車を時間調整することで乗客の不満が分散されるので、不満度のピーク値は改善されるが、それにより遅れの影響を受ける乗客数は増えるので、結果として不満度の合計値はかえって大きくなってしまったからであると考えられる。

以上をまとめると、2分間隔で運行する放射線については、以下のことがいえる。

- 遅れが大きいほど、時間調整による不満度の合計値とピーク値の改善効果は大きくなる。
- 不満度がゼロになる（ダイヤが正常に回復する）ことだけを考慮するなら、時間調整は列車1台で十分である。
- 不満度の合計値を小さくするのならば、時間調整は列車2台までに収めておくほうがよい。
- 不満度のピーク値を小さくするのならば、より多く（今回確認したのは3台まで）の列車を時間調整したほうがよい。

D=60秒のときの、不満度のピーク値を最小にする時間調整の不満度曲線を以下に示す。

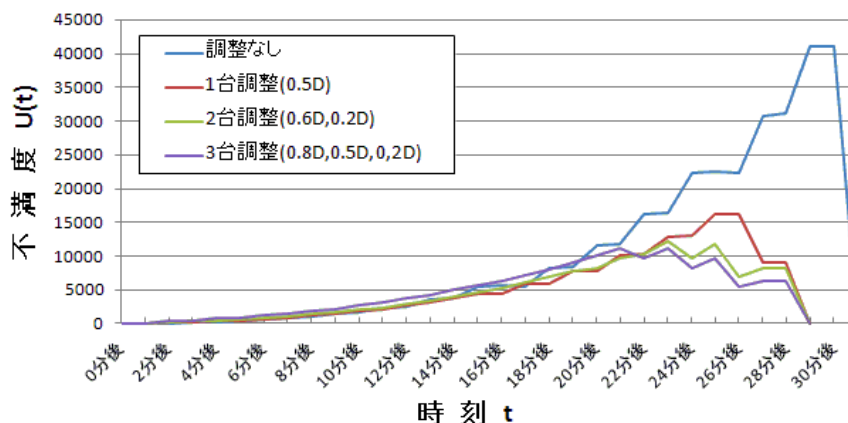


図 26: [放射線 2 分間隔] D=60 秒のときピーク値を最小にする不満度曲線

また，時間調整なし，1台調整，2台調整，3台調整のそれぞれのダイヤグラムを以下に示す（時間調整なしの図は§3の図14の再掲）

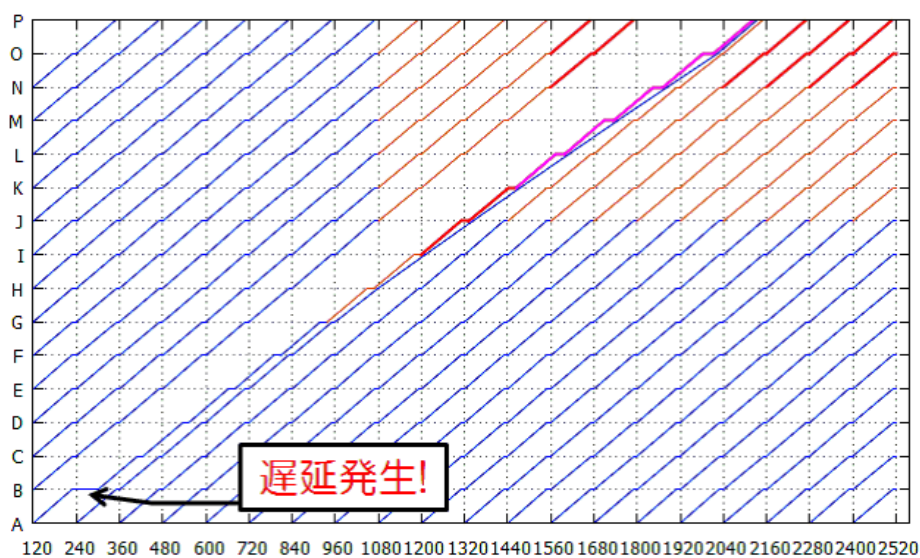


図 27: [放射線 2 分間隔]  $D=60$  秒で時間調整なしの場合

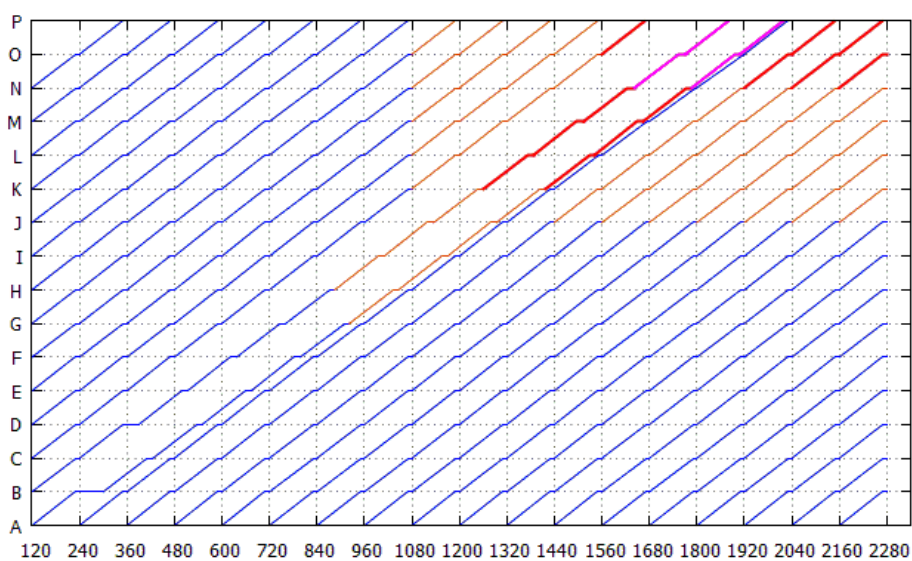


図 28: [放射線 2 分間隔]  $D=60$  秒で 1 台時間調整 ( $0.5D$ )

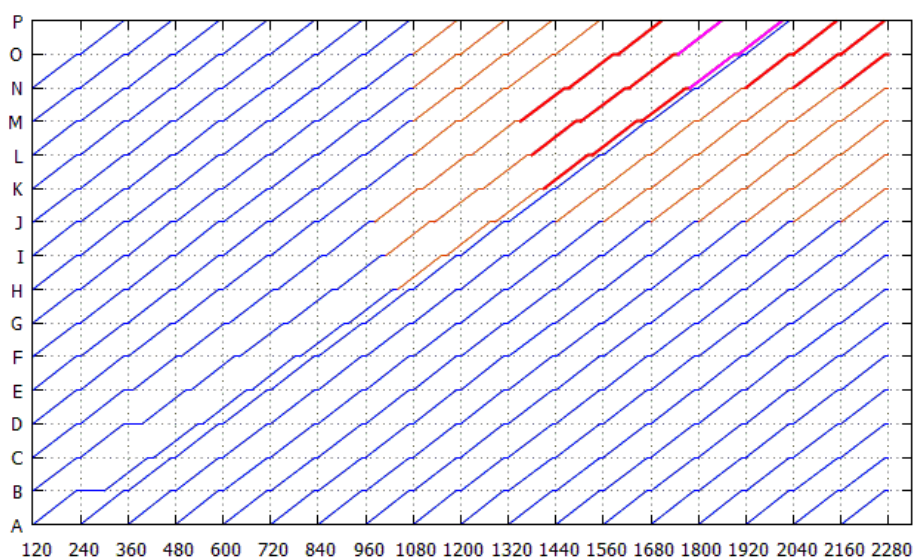


図 29: [放射線 2 分間隔]  $D=60$  秒で 2 台時間調整 ( $0.6D, 0.2D$ )

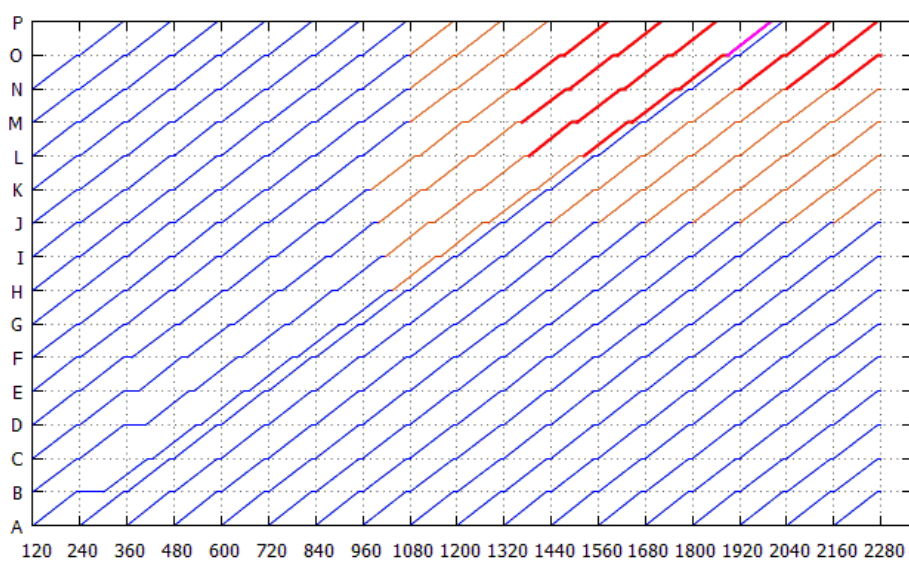


図 30: [放射線 2 分間隔]  $D=60$  秒で 3 台時間調整 ( $0.8D, 0.5D, 0.2D$ )

時間調整が 1 台の場合で、各調整量の場合での評価尺度の値を以下に示す。

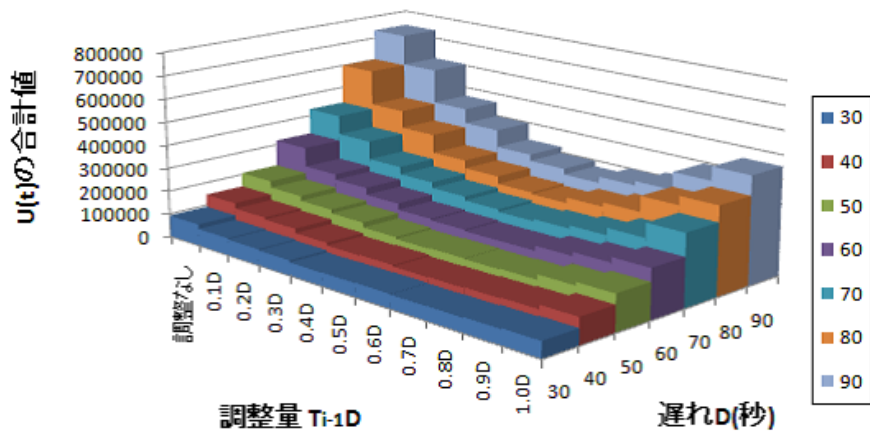


図 31: [放射線 2 分間隔] 各調整量での不満度の合計値

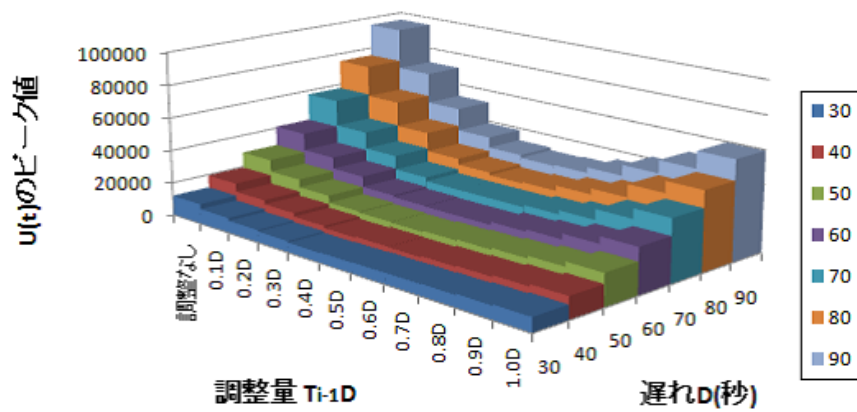


図 32: [放射線 2 分間隔] 各調整量での不満度の合計値

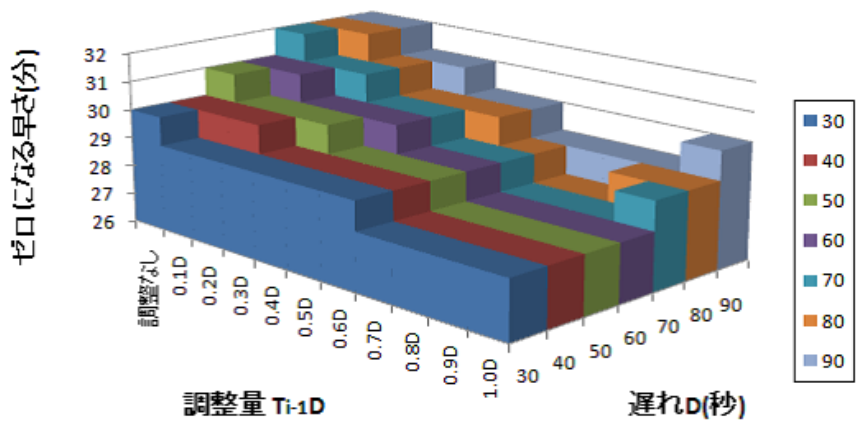


図 33: [放射線 2 分間隔] 各調整量での不満度の合計値

### 6.1.2 放射線の4分間隔ダイヤ

次に、放射線の4分間隔のダイヤの場合を考える。4分間隔の場合、列車同士の間隔が倍になるので、遅れも倍にして考える。D=60,80,100,120,140,160,180(秒)という具合になる。

4分間隔の場合の、各評価尺度が最善になる利用者不満度関数の値と時間調整のパターンを算出した結果を以下に示す。



表 3: [放射線 4 分間隔] の分析 (結果赤字は調整台数を増やすことにより値が悪化したことを示す)

遅れD(秒)		調整なし	1台調整	2台調整	3台調整
60	不満度の合計値	176,389	173,212	171,744	177,089
	調整パターン	-	0.6D	0.4D, 0.1D	0.4D, 0.1D, 0.1D
	不満度のピーク値	20,056	13,517	12,594	12,452
	調整パターン	-	0.4D	0.5D, 0.3D	0.5D, 0.4D, 0.1D
	ゼロになる早さ(分)	31	29	29	29
	調整パターン	-	1.0D	1.0D, 0.1D	1.0D, 0.1D, 0.1D
	<hr/>				
80	不満度の合計値	293,779	240,404	249,520	255,773
	調整パターン	-	0.4D	0.4D, 0.1D	0.4D, 0.1D, 0.1D
	不満度のピーク値	31,165	19,822	17,721	17,567
	調整パターン	-	0.4D	0.4D, 0.1D	0.6D, 0.5D, 0.3D
	ゼロになる早さ(分)	31	29	29	29
	調整パターン	-	1.0D	1.0D, 0.1D	1.0D, 0.1D, 0.1D
	<hr/>				
100	不満度の合計値	408,914	327,431	333,356	341,532
	調整パターン	-	0.5D	0.5D, 0.1D	0.5D, 0.1D, 0.1D
	不満度のピーク値	44,610	27,335	23,852	23,353
	調整パターン	-	0.4D	0.6D, 0.4D	0.7D, 0.5D, 0.31D
	ゼロになる早さ(分)	31	29	29	29
	調整パターン	-	1.0D	1.0D, 0.1D	1.0D, 0.1D, 0.1D
	<hr/>				
120	不満度の合計値	556,057	447,796	448,959	462,880
	調整パターン	-	0.5D	0.5D, 0.1D	0.5D, 0.1D, 0.1D
	不満度のピーク値	61,404	37,116	33,116	31,396
	調整パターン	-	0.5D	0.6D, 0.4D	0.7D, 0.6D, 0.5D
	ゼロになる早さ(分)	31	30	30	30
	調整パターン	-	0.4D	0.5D, 0.1D	0.5D, 0.1D, 0.1D
	<hr/>				
140	不満度の合計値	711,986	565,289	565,586	575,713
	調整パターン	-	0.6D	0.6D, 0.1D	0.7D, 0.1D, 0.1D
	不満度のピーク値	81,186	43,603	40,786	38,782
	調整パターン	-	0.5D	0.6D, 0.4D	0.7D, 0.6D, 0.4D
	ゼロになる早さ(分)	32	30	30	30
	調整パターン	-	0.6D	0.6D, 0.1D	0.6D, 0.1D, 0.1D
	<hr/>				
160	不満度の合計値	1,003,663	730,756	702,377	715,928
	調整パターン	-	0.7D	0.7D, 0.1D	0.7D, 0.1D, 0.1D
	不満度のピーク値	105,393	52,157	49,464	47,152
	調整パターン	-	0.5D	0.6D, 0.2D	0.7D, 0.6D, 0.4D
	ゼロになる早さ(分)	32	30	30	30
	調整パターン	-	0.7D	0.7D, 0.1D	0.7D, 0.1D, 0.1D
	<hr/>				
180	不満度の合計値	1,238,362	863,022	826,783	842,805
	調整パターン	-	0.7D	0.7D, 0.1D	0.7D, 0.1D, 0.1D
	不満度のピーク値	132,119	65,254	53,560	53,813
	調整パターン	-	0.5D	0.7D, 0.4D	0.7D, 0.4D, 0.1D
	ゼロになる早さ(分)	33	30	30	30
	調整パターン	-	0.8D	0.8D, 0.1D	0.8D, 0.1D, 0.1D

4分間隔の場合でも、2分間隔のときと同様に、時間調整をすることにより、各評価尺度の値は改全体的に改善されている。

1台調整した場合だと、不満度がゼロになるのかかる時間は最大で3分短縮されているが、2台調整、3台調整の場合は更なる時間の短縮は見られなかった。

不満度の合計値とピーク値については、2分間隔で90秒遅れのときには60%以上改善されていたが、4分間隔で180秒遅れのときは合計値の改善は約30%、ピーク値の改善は約50%であり、2分間隔のときほど大きな改善は見られなかった。60秒遅れのときにいたっては、合計値はほとんど改善されなかった。

次に2台調整した場合だと、不満度のピーク値については、1台調整の場合と比べてさらに値が5~15%ほど改善されている。しかし合計値については、遅れが80,100,120,140秒のときは値が悪化しており、それ以外のときは改善しているが、改善幅は最大でも4%程度であった。

次に3台調整した場合だと、不満度のピーク値はあまり改善せず、最大でも5%程度の改善にとどまった。また、遅れが180秒のときは値が悪化してしまった。合計値にいたっては全ての遅れの場合で2台調整のときと比べて値が悪化している。

以上をまとめると、4分間隔で運行する放射線については、以下のことがいえる。

- 遅れが大きいほど、時間調整による不満度の合計値とピーク値の改善効果は2分間隔のときほどではないが大きくなる。
- 不満度がゼロになる（ダイヤが正常に回復する）ことだけを考慮するなら、時間調整は列車1台で十分である。
- 不満度の合計値を小さくするのならば、時間調整は列車1台で十分である。また、遅れが60秒程度であれば何もしなくても大きな問題は無い。
- 不満度のピーク値を小さくするのならば、時間調整は列車2台までに収めておくほうがよい。

2分間隔の場合と比べて各評価尺度の値の改善幅が小さいのは、4分間隔の場合だと列車が数珠つなぎになる現象が発生しにくいからであると考えられる。4分間隔の放射線で列車が60秒遅れ120秒遅れのときの、不満度のピーク値を最小にする時間調整の不満度曲線と時間調整を行わない場合のダイヤグラムを以下に示す。遅れが60秒だと時間調整を行わなくても列車が数珠つなぎになっておらず、120秒のときでも終点のすぐ手前で2台の列車が数珠つなぎになる程度で済んでいる。

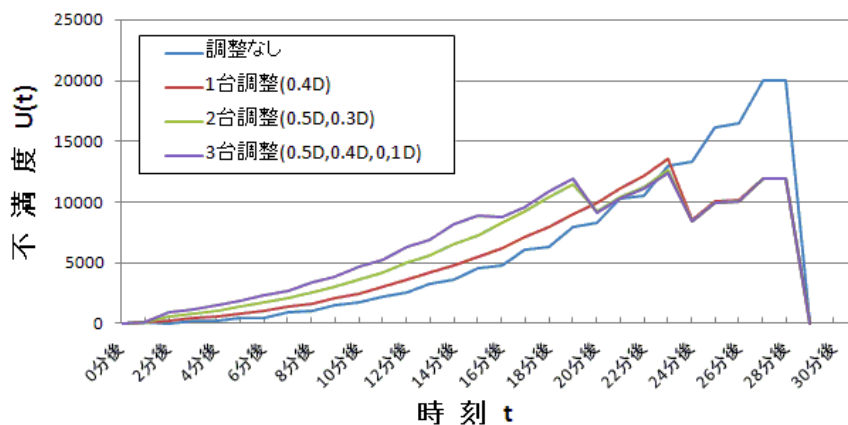


図 34: [放射線 4分間隔] D=60 秒のときピーク値を最小にする不満度曲線

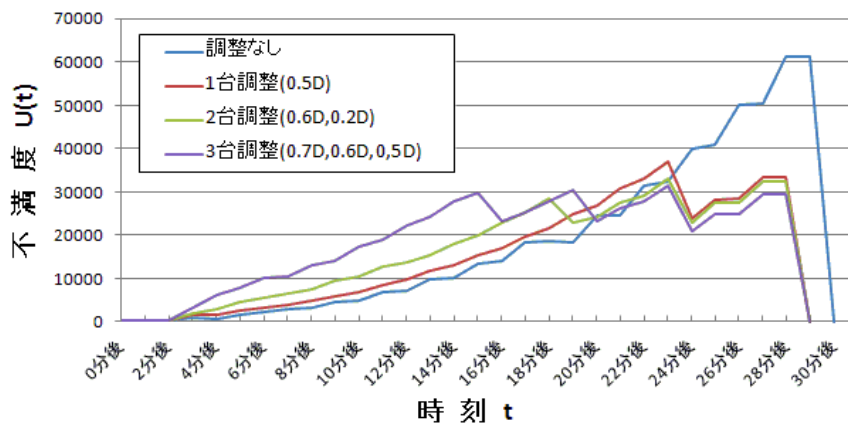


図 35: [放射線 4 分間隔]  $D=120$  秒のときピーク値を最小にする不満度曲線

ここで、図 26、図 34、図 35 の不満度曲線の比較を行っておきたい。いずれの場合においても、時間調整を行った直後の不満度は時間調整を行わない場合より高い値になり、特に 4 分間隔の場合の図 34 と図 35 ではその傾向が顕著である。そして不満度の値が逆転（調整した場合の曲線が調整なしの曲線を下回る）するにはおおよそ 20 分前後の時間を要していることが分かる。つまり、時間調整の効果が現れるのには約 20 分の時間を要するということである。逆にいうならば、列車の遅れが発生した地点が終着駅から 20 分以内の地点であれば、時間調整による不満度の改善効果が出ないまま不満度がゼロに戻ってしまうことになる。

今回のシミュレーションでは列車が初めに遅れる地点は始発駅に近いところに設定しているが、もし列車が遅れた地点が終着駅に近い位置であるのならば、ダイヤ調整をあえて行わないことも選択肢として考えられる。

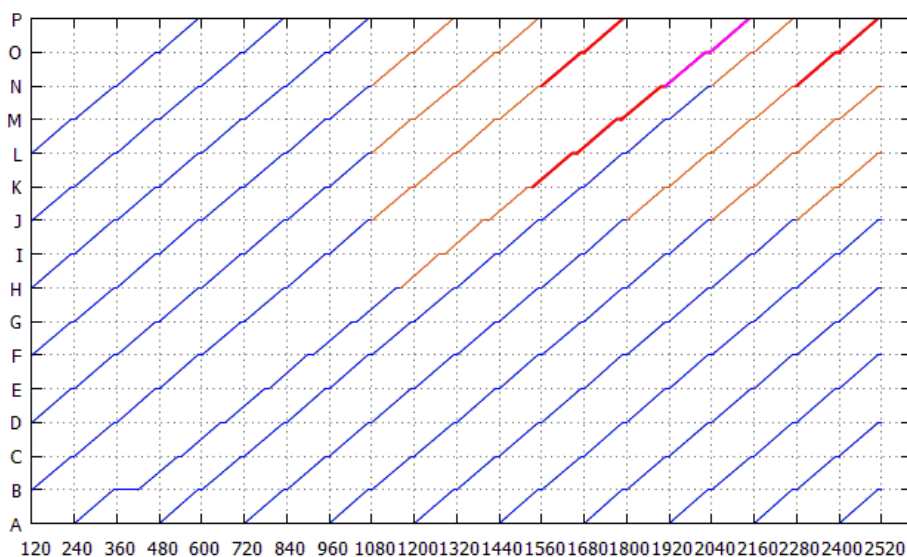


図 36: [放射線 4 分間隔]  $D=60$  秒で時間調整なしの場合

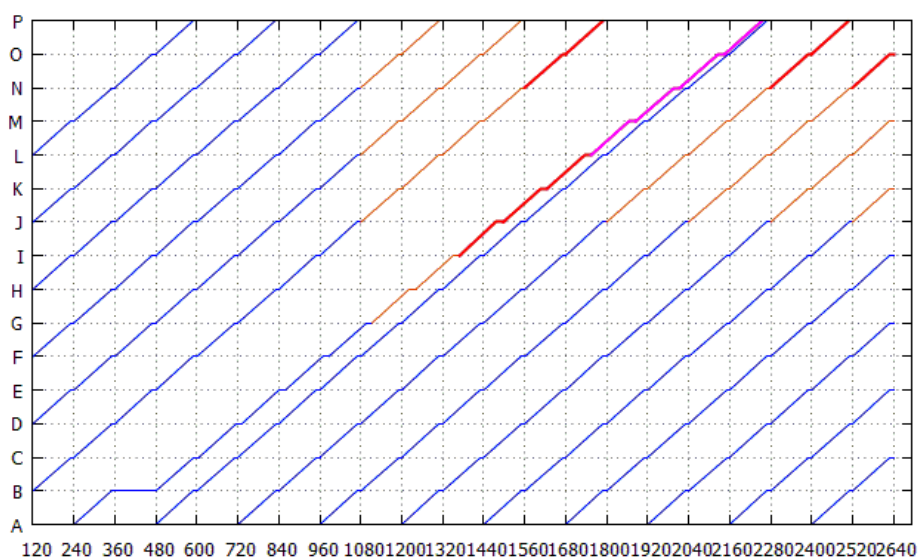


図 37: [放射線 4 分間隔]  $D=120$  秒で時間調整なしの場合

時間調整が 1 台の場合で、各調整量の場合での評価尺度の値を以下に示す。

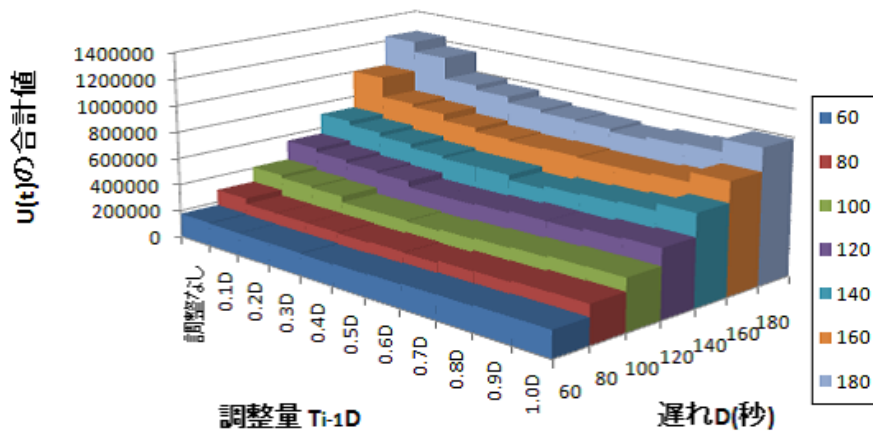


図 38: [放射線 4 分間隔] 各調整量での不満度の合計値

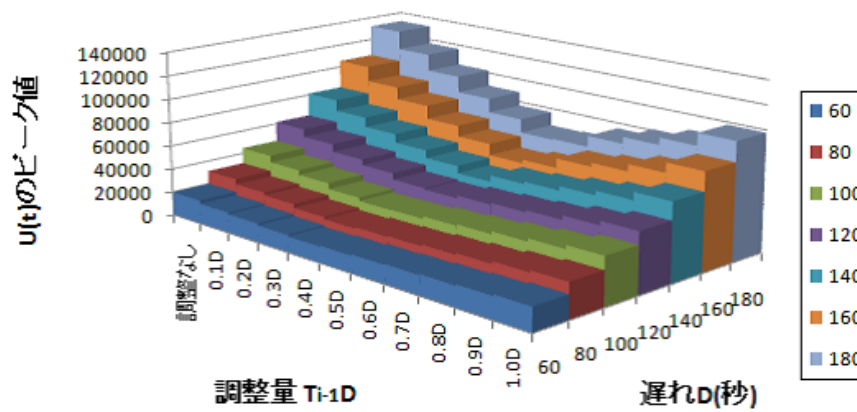


図 39: [放射線 4 分間隔] 各調整量での不満度の合計値

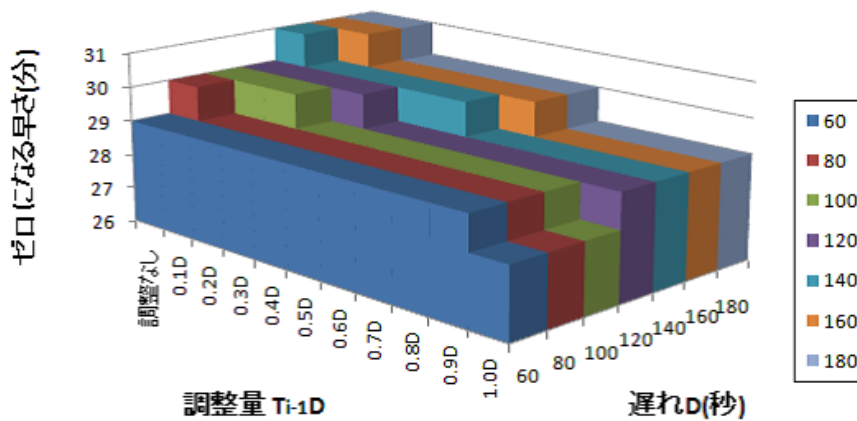


図 40: [放射線 4 分間隔] 各調整量での不満度の合計値

## 6.2 環状線の場合

環状線の場合は、初めに遅れた列車が路線内を3周し終わるまでをシミュレーションした。また、環状線の場合は、放射線とは違い全ての列車が永久的に運行を続けることから、不満度がゼロに戻ることは無いため、評価尺度の“ゼロになる早さ”は“列車が3周する所要時間”と置き替えている。

### 6.2.1 環状線の2分間隔ダイヤ

2分間隔の場合の、各評価尺度が最善になる利用者不満度関数の値と時間調整のパターンを算出した結果を以下に示す。

表 4: [環状線 2 分間隔] の分析結果

遅れD(秒)		調整なし	1台調整	2台調整	3台調整
30	不満度の合計値	164,389,170	2,749,935	771,260	549,589
	調整パターン	-	0.2D	0.6D, 0.2D	1.0D, 0.5D, 0.1D
	不満度のピーク値	10,633,042	238,878	63,512	35,708
	調整パターン	-	0.2D	0.6D, 0.2D	1.0D, 0.5D, 0.1D
40	3周の所要時間(分)	131	100	96	95
	調整パターン	-	0.2D	0.6D, 0.2D	1.0D, 0.5D, 0.1D
	不満度の合計値	411,744,614	5,337,428	1,270,151	557,083
	調整パターン	-	0.2D	0.6D, 0.2D	0.9D, 0.4D, 0.1D
50	不満度のピーク値	22,613,193	433,849	76,642	32,257
	調整パターン	-	0.2D	0.4D, 0.1D	0.9D, 0.4D, 0.1D
	3周の所要時間(分)	142	102	97	96
	調整パターン	-	0.2D	0.6D, 0.2D	0.9D, 0.4D, 0.1D
60	不満度の合計値	870,315,533	8,762,066	2,051,017	790,150
	調整パターン	-	0.2D	0.6D, 0.2D	0.8D, 0.4D, 0.1D
	不満度のピーク値	40,831,164	697,448	131,499	47,721
	調整パターン	-	0.2D	0.4D, 0.1D	0.8D, 0.4D, 0.1D
70	3周の所要時間(分)	153	104	99	97
	調整パターン	-	0.2D	0.6D, 0.2D	0.8D, 0.4D, 0.1D
	不満度の合計値	1,606,934,763	13,925,383	4,078,352	933,666
	調整パターン	-	0.2D	0.7D, 0.2D	0.8D, 0.4D, 0.1D
80	不満度のピーク値	67,002,003	1,086,340	318,455	58,769
	調整パターン	-	0.2D	0.5D, 0.1D	0.8D, 0.4D, 0.1D
	3周の所要時間(分)	163	106	101	96
	調整パターン	-	0.2D	0.6D, 0.2D	0.8D, 0.4D, 0.1D
90	不満度の合計値	2,769,770,825	21,556,122	5,481,941	1,531,373
	調整パターン	-	0.2D	0.7D, 0.2D	0.9D, 0.4D, 0.1D
	不満度のピーク値	106,236,480	1,606,046	377,317	97,287
	調整パターン	-	0.2D	0.4D, 0.1D	0.9D, 0.4D, 0.1D
100	3周の所要時間(分)	175	109	102	97
	調整パターン	-	0.2D	0.6D, 0.2D	0.9D, 0.4D, 0.1D
	不満度の合計値	4,414,217,393	33,002,329	7,502,918	1,891,237
	調整パターン	-	0.2D	0.5D, 0.1D	0.9D, 0.4D, 0.1D
110	不満度のピーク値	152,532,252	2,306,234	430,082	121,139
	調整パターン	-	0.2D	0.4D, 0.1D	0.9D, 0.4D, 0.1D
	3周の所要時間(分)	186	112	104	97
	調整パターン	-	0.2D	0.6D, 0.2D	0.9D, 0.4D, 0.1D
120	不満度の合計値	6,488,956,524	45,614,447	10,602,840	1,907,142
	調整パターン	-	0.2D	0.5D, 0.1D	0.8D, 0.4D, 0.1D
	不満度のピーク値	209,284,529	2,997,369	715,849	133,987
	調整パターン	-	0.2D	0.5D, 0.1D	0.8D, 0.4D, 0.1D
130	3周の所要時間(分)	196	115	106	96
	調整パターン	-	0.2D	0.6D, 0.2D	0.8D, 0.4D, 0.1D

環状線で2分間隔の場合は、1台時間調整を行うだけで、各評価尺度の値は劇的に改善された。180秒遅れの場合で時間調整を行わなければ、列車が環状線を3周するのに、本来では100以内であるところが倍の200分近くもかかっているが、時間調整のおかげで大幅に改善されている。

環状線の場合は、放射線とは違い、1度遅れた列車は路線から消えることなく2週目、3週目と路線内をずっと周回することになる。時間調整を行わなかった場合は、遅れの大きさにかかわらず全ての列車が数珠つなぎになってしまう。遅れを60秒として時間調整を行わなかったときのダイヤグラムが図41である。

各評価尺度の改善幅を見ていくと、放射線の場合では、2台調整から3台調整への値の改善幅はそれほど大きくはなかったが、今回の場合では30秒遅れのときの不満度の合計値は約30%、ピーク値は約47%改善しており、180秒遅れのときは合計値、ピーク値ともに約80%改善している。遅れが大きいほど時間調整による効果が大きく、より多くの列車を時間調整することが重要であるといえる。今回は列車3台までの時間調整しか考慮していないが、4台、5台と調整する台数を増やせば、さらに改善効果が大きくなることが期待できる。

以上をまとめると、2分間隔で運行する環状線については、以下のことがいえる。

- 遅れが大きいほど、時間調整による不満度の合計値とピーク値の改善効果は大きくなる。
- 不満度の合計値、ピーク値、列車の所要時間を短くするには、できるだけ多くの列車を時間調整したほうがよい。

そして今回の場合は、3台調整を行うときの各評価尺度を同じにする調整パターンが同じになるという結果になった。D=30秒のときは「1.0D, 0.5D, 0.1D」、D=50,60,90秒のときは「0.8D, 0.4D, 0.1D」、D=40,70,80秒のときは「0.9D,0.4D,0.1D」という具合である。

D=60秒で台の列車を「0.8D, 0.4D, 0.1D」のパターンで時間調整したときのダイヤグラムを図42に示す。

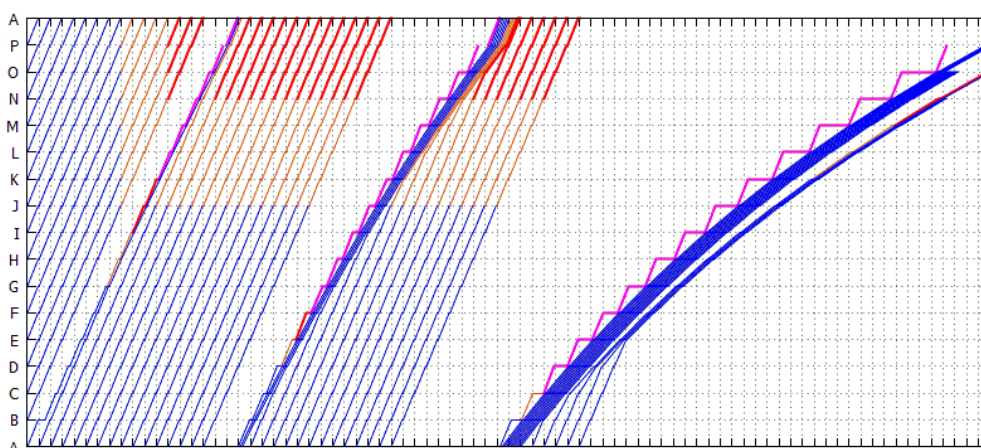


図 41: [環状線 2 分間隔] D=60 秒で時間調整なしの場合



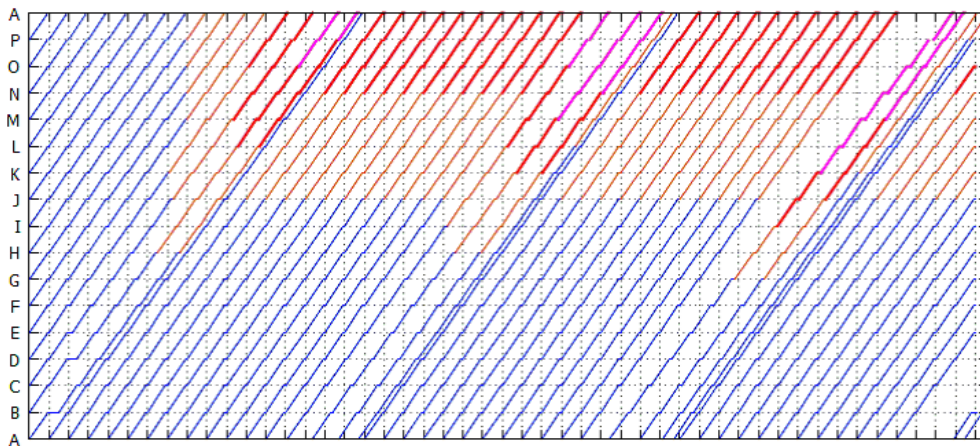


図 42: [環状線 2 分間隔]  $D=60$  秒で 3 台時間調整 (0.8D,0.4D,0.1D)

$D=60$  秒のときの、不満度のピーク値を最小にする時間調整の不満度曲線を以下に示す。なお、時間調整なしの場合の不満度があまりにも高い値となるため、グラフの縦軸は対数表示としている。また、曲線が山形になっているのは、路線を 1 周し終える度に乗客を全員降ろしているためである。

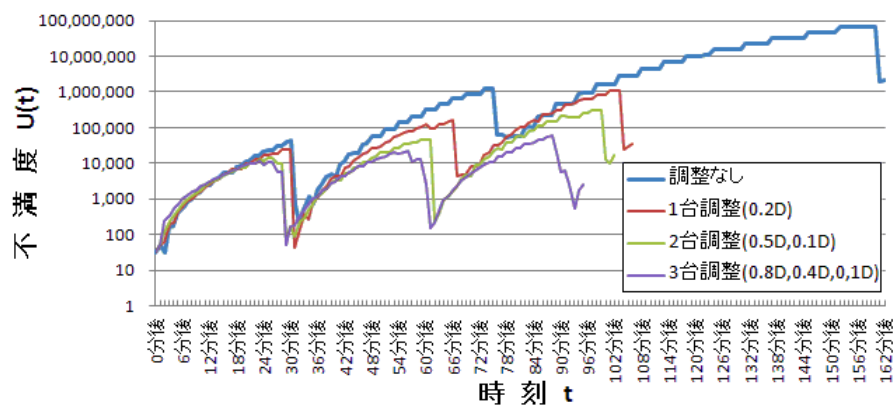


図 43: [環状線 2 分間隔]  $D=60$  秒のときピーク値を最小にする不満度曲線 (対数表示)

図 43 から時間調整なしの場合の要素を削除し、縦軸を通常に戻した場合のグラフが図 44 である。調整台数を増やした場合の不満度の改善幅が非常に大きいことが分かる。

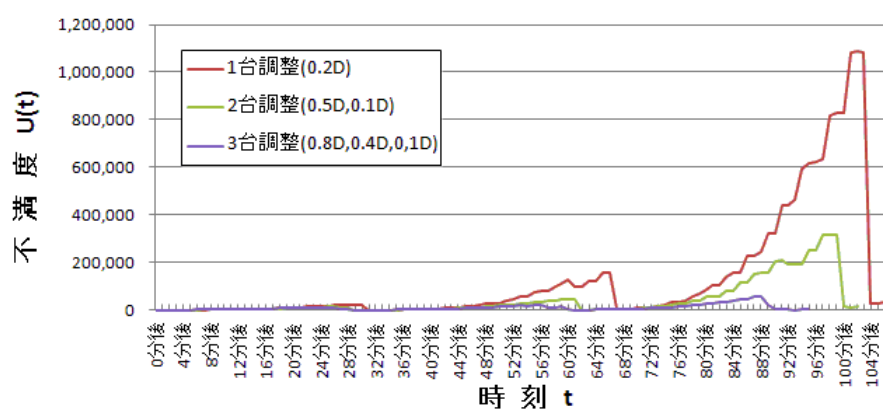


図 44: [環状線 2 分間隔]  $D=60$  秒のときピーク値を最小にする不満度曲線

時間調整が 1 台の場合で、各調整量の場合での評価尺度の値を以下に示す。

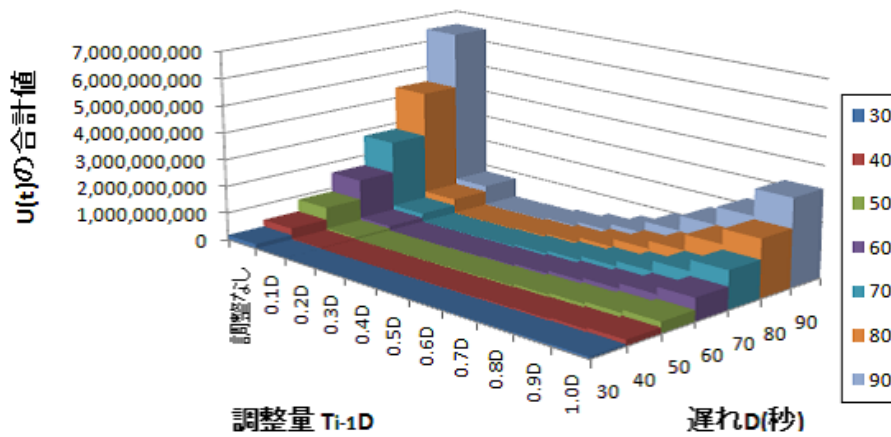


図 45: [環状線 2 分間隔] 各調整量での不満度の合計値

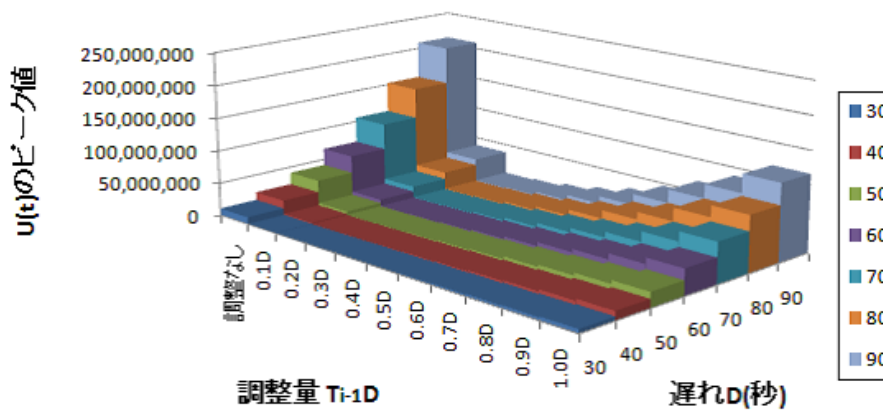


図 46: [環状線 2 分間隔] 各調整量での不満度の合計値

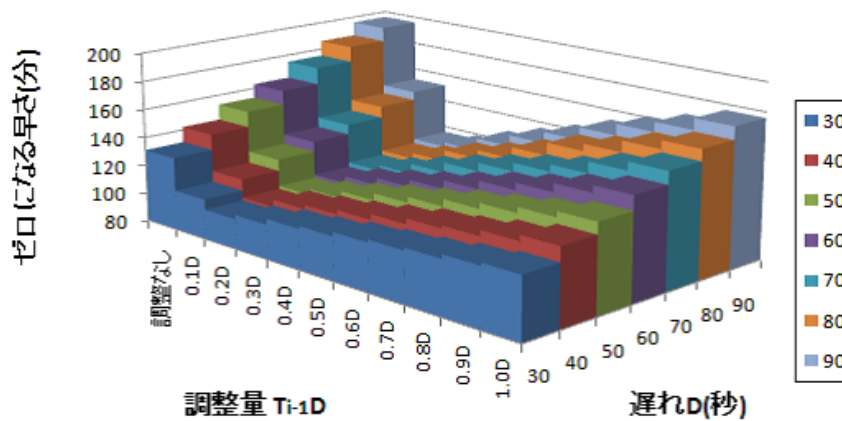


図 47: [環状線 2 分間隔] 各調整量での不満度の合計値

### 6.2.2 環状線の4分間隔ダイヤ

2分間隔の場合の、各評価尺度が最善になる利用者不満度関数の値と時間調整のパターンを算出した結果を以下に示す。

表 5: [環状線 4 分間隔] の分析結果

遅れD(秒)		調整なし	1台調整	2台調整	3台調整
60	不満度の合計値	3,904,969	1,009,886	908,585	853,396
	調整パターン	-	0.4D	0.6D, 0.3D	0.8D, 0.5D, 0.2D
	不満度のピーク値	306,017	57,453	32,503	25,256
	調整パターン	-	0.3D	0.5D, 0.2D	0.8D, 0.6D, 0.3D
80	3周の所要時間(分)	103	96	95	95
	調整パターン	-	0.4D	1.0D, 0.3D	1.0D, 0.4D, 0.1D
	不満度の合計値	7,154,046	1,510,193	1,253,384	1,237,362
	調整パターン	-	0.4D	0.6D, 0.2D	0.9D, 0.4D, 0.1D
100	不満度のピーク値	86,649	86,649	48,181	36,637
	調整パターン	-	0.3D	0.6D, 0.2D	0.8D, 0.5D, 0.2D
	3周の所要時間(分)	105	96	96	96
	調整パターン	-	0.6D	0.6D, 0.1D	0.6D, 0.1D, 0.1D
120	不満度の合計値	12,597,740	2,234,182	1,622,670	1,563,976
	調整パターン	-	0.4D	0.7D, 0.3D	0.8D, 0.4D, 0.1D
	不満度のピーク値	918,993	117,340	61,185	43,062
	調整パターン	-	0.3D	0.6D, 0.2D	0.8D, 0.5D, 0.2D
140	3周の所要時間(分)	107	97	96	96
	調整パターン	-	0.5D	0.6D, 0.1D	0.7D, 0.2D, 0.1D
	不満度の合計値	19,290,278	3,199,092	2,213,563	2,086,977
	調整パターン	-	0.4D	0.7D, 0.3D	0.8D, 0.5D, 0.2D
160	不満度のピーク値	1,390,923	172,303	79,184	57,016
	調整パターン	-	0.3D	0.6D, 0.2D	0.8D, 0.5D, 0.2D
	3周の所要時間(分)	110	97	96	96
	調整パターン	-	0.5D	0.8D, 0.2D	0.7D, 0.2D, 0.1D
180	不満度の合計値	27,792,626	4,370,327	2,701,906	2,557,509
	調整パターン	-	0.4D	0.7D, 0.3D	0.9D, 0.6D, 0.2D
	不満度のピーク値	2,013,040	220,741	93,635	67,424
	調整パターン	-	0.3D	0.6D, 0.2D	0.9D, 0.5D, 0.2D
200	3周の所要時間(分)	112	98	96	96
	調整パターン	-	0.5D	0.8D, 0.3D	0.8D, 0.3D, 0.1D
	不満度の合計値	39,328,124	5,297,914	3,488,694	3,113,835
	調整パターン	-	0.4D	0.8D, 0.3D	0.8D, 0.5D, 0.2D
220	不満度のピーク値	2,836,099	288,037	123,088	74,146
	調整パターン	-	0.4D	0.6D, 0.2D	0.8D, 0.5D, 0.2D
	3周の所要時間(分)	114	98	96	96
	調整パターン	-	0.5D	0.8D, 0.3D	0.9D, 0.4D, 0.1D
240	不満度の合計値	55,976,602	6,722,735	4,117,644	3,653,690
	調整パターン	-	0.4D	0.8D, 0.3D	0.8D, 0.5D, 0.2D
	不満度のピーク値	3,850,479	369,242	135,621	90,283
	調整パターン	-	0.4D	0.6D, 0.2D	0.8D, 0.5D, 0.2D
260	3周の所要時間(分)	117	99	96	96
	調整パターン	-	0.5D	0.8D, 0.3D	0.9D, 0.4D, 0.1D

4分間隔の場合では、時間調整を行わなくても、2分間隔のときほど不満度が跳ね上がることは無かったので、時間調整を行ったことによる改善幅は2分間隔のときほど大きくは無いが、全体的に値は改善されている。

列車の所要時間については、2台調整までは改善が見られるが、3台調整によりさらに所要時間が短くなることは無かった。

不満度の合計値は、60秒遅れのときは1台調整により約74%、ピーク値は約80%改善しており、180秒遅れの時は合計値は約87%、ピーク値は約90%改善しており、遅れが大きいほど改善の効果が大きくなっている。

また、2台調整した場合だと、合計値と不満度はさらに改善され、3台調整したもさらに改善されている。ピーク値については、60秒遅れのとき、3台調整によりさらに約22%、180秒遅れの時はさらに約33%改善しており、調整台数を増やせばまだまだ改善の余地があると考えられる。

しかし、不満度の合計値については、60秒遅れのときの3台調整による改善は約6%、180秒遅れのときでも改善は約10%程度にとどまっており、これ以上の改善はあまり見込まれないと考えられる。

以上をまとめると、4分間隔で運行する環状線については、以下のことがいえる。

- 遅れが大きいほど、時間調整による不満度の合計値とピーク値の改善効果は2分間隔のときほどではないが大きくなる。
- 列車運行の所要時間を短くすることだけを考慮するなら、時間調整は列車2台で十分である。
- 不満度の合計値を小さくするのならば、列車3台を時間調整すれば十分である。
- 不満度のピーク値を小さくするのならば、より多くの列車を時間調整したほうがよい。

D=120秒の場合で時間調整なしのダイヤグラムを以下に示す。2分間隔の場合とは違い、全ての列車が数珠つなぎになるまでには至らなかった。

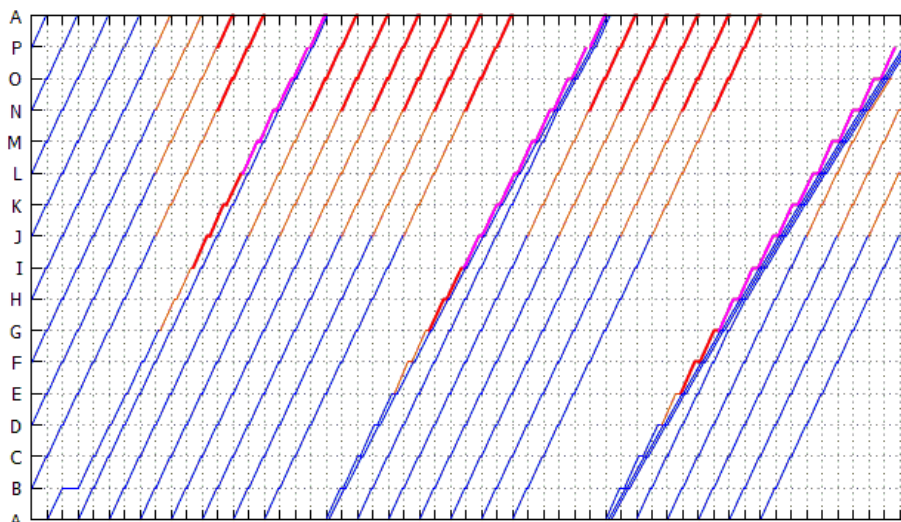


図 48: [環状線 4分間隔] D=120秒で時間調整なしの場合

また、 $D=120$  秒の場合で3台の列車を時間調整 ( $0.8D, 0.5D, 0.2D$ ) した場合のダイヤグラムを以下に示す。図 48 では5台の列車が数珠つなぎになっていたが、時間調整により、2台の列車の間隔が狭まる（数珠つなぎには辛うじてなっていない）程度で済んでいる。

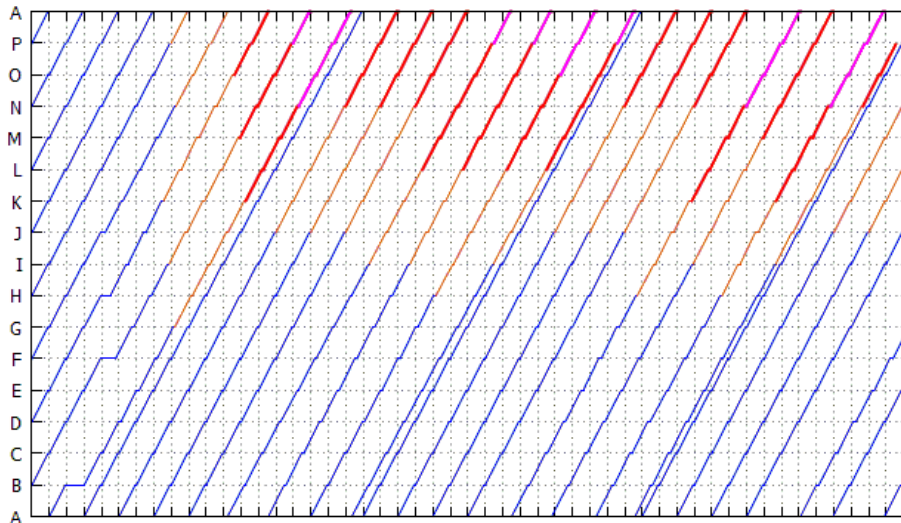


図 49: [環状線 4 分間隔]  $D=120$  秒で 3 台時間調整 ( $0.8D, 0.5D, 0.2D$ )

$D=120$  秒のときの、不満度のピーク値を最小にする時間調整の不満度曲線を以下に示す（グラフの縦軸は対数表示としている）

放射線の場合のときにも述べたが、時間調整を行ってその改善効果が不満度曲線に現れるのにはある程度時間がかかる。放射線の場合では列車の遅れが発生した場所によっては運転整理をあえて行わない選択肢もあり得ると述べた。しかし環状線の場合では、2週目、3週目と列車の運行が継続されるので、列車の遅れが発生した場所にかかわらず、時間調整はすぐに行うのが得策だといえる。

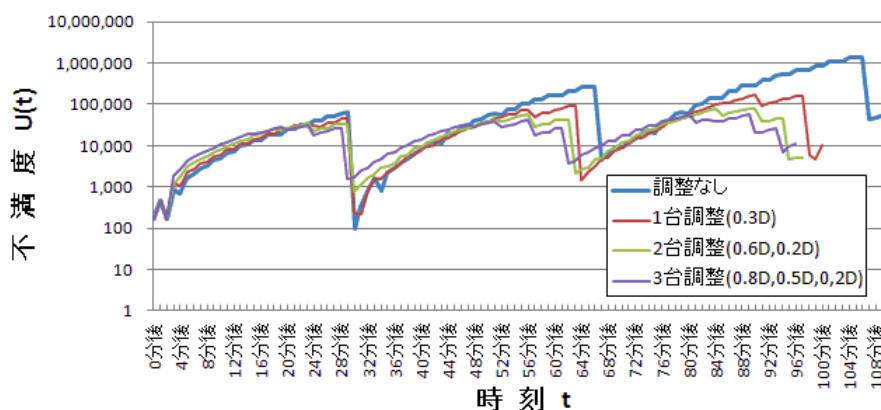


図 50: [環状線 4 分間隔]  $D=120$  秒のときピーク値を最小にする不満度曲線（対数表示）

時間調整が1台の場合で、各調整量の場合での評価尺度の値を以下に示す。

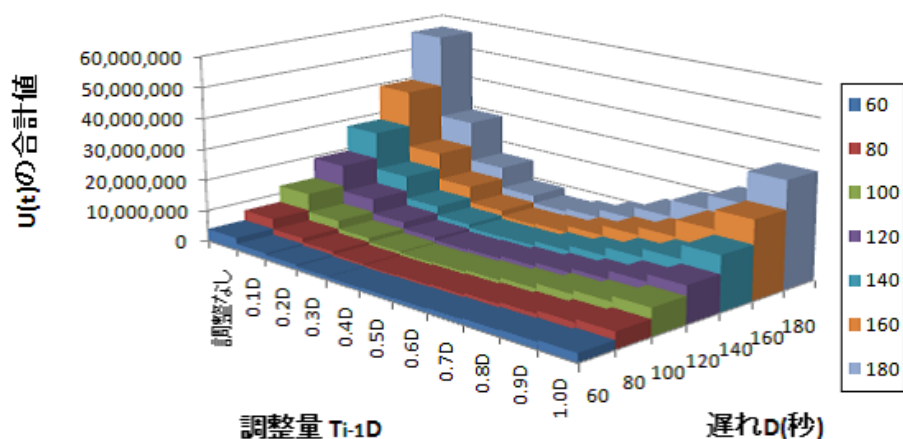


図 51: [環状線 4 分間隔] 各調整量での不満度の合計値

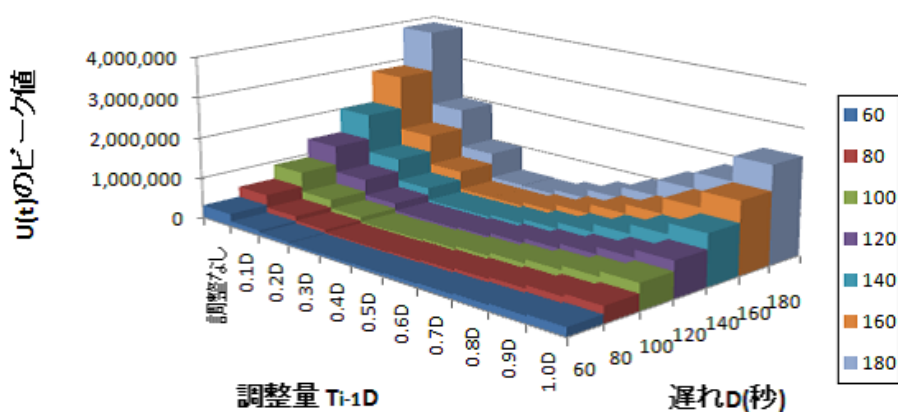


図 52: [環状線 4 分間隔] 各調整量での不満度の合計値

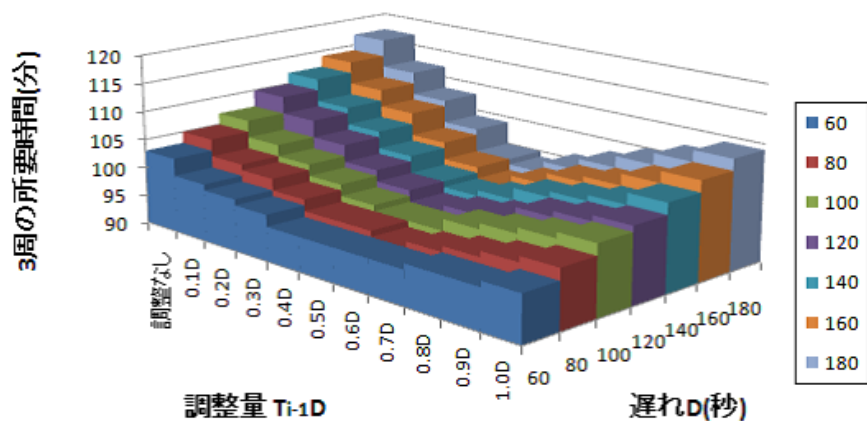


図 53: [環状線 4 分間隔] 各調整量での不満度の合計値



## 7 まとめ

本研究では、利用者の不満度からダイヤの利便性を評価する、利用者不満度関数の定義を行い、合計4種類の路線で最適な運転整理（時間調整）のパターンを算出した。

まず4種類のダイヤ全てで共通していえることは、列車の遅れが大きければ大きいほど、時間調整による不満度の改善効果が大きいということである。遅れが大きいきほどより迅速で最適なパターンに沿った運転整理が求められる。

放射線と環状線の比較という点では、環状線は放射線の場合よりも多くの列車を時間調整したほうがよいことが分かった。特に2分間隔の環状線では、調整台数をさらに増やせば不満度のピーク値の更なる改善が見込まれる。しかし調整台数を増やせば計算すべきパターンもさらに増え、計算にかかる時間も膨大になる。今以上に効率のよいシミュレーションの方法を考える必要があり、今後の課題でもある。

2分間隔ダイヤと4分間隔ダイヤの比較という点では、4分間隔ダイヤでは、2分間隔ダイヤよりも時間調整による不満度の改善が大きくないことが分かった。特に放射線の4分間隔ダイヤでは、時間調整を行う台数が多すぎてしまうと、改善どころがかえって不満度が悪化してしまうことが確認できた。“たくさんの列車を時間調整した方が良い”とは一概にはいえないということである。

さらに今後の課題として、今回は空想上の鉄道路線で行ったシミュレーションの結果を、実在の鉄道路線に当てはめてみることを考えられる。仮に今回の研究結果と近い答えが得ることができれば、非常に興味深いであろう。

また、今回は各列車の時間調整は、次の停車駅ですぐに行われることにしているが、実際では指令所から列車への時間調整の指示にはある程度の時間がかかる。実際の路線に当てはめて考えるなら、そういう点も考慮する必要があるだろう。

## 参考文献

- [1] 富井規雄「列車ダイヤのひみつ -定時運行のしくみ-」, 成山堂書店 (2005)
- [2] 運輸政策研究機構「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル」, (2005)
- [3] 村越暁子, 國松武俊, 齊藤綾乃, 鉄道総研報告 RITI 22 (2008) p49-p54
- [4] 寺田寅彦「寺田寅彦随筆集 第2巻」, 岩波書店 (1964)(初出は 1922)
- [5] 富井規雄 ほか「鉄道ダイヤ回復の技術」, オーム社 (2010)