

鉄道事故に伴う旅客の損失時間の推計手法に関する研究*

Estimation method of traveler's loss of time caused by railway accidents*

高田和幸**・吉澤智幸***

By Kazuyuki Takada**・Tomoyuki Yoshizawa***

1. はじめに

首都圏の山手線内では鉄道ネットワークが密に整備されており、ある路線で列車の運行が停止した際にも、旅客は他の路線を利用して移動することが可能である。一方、山手線の外側の地域では、ネットワークが密に整備されているとは言えず、一度、列車の運行が停止すると、多くの移動困難者が発生する。首都圏では、運行遅延に伴う鉄道事故が多数発生しており、これらの事故により旅客は多大な時間損失を被っていると考えられる。

これまでの都市鉄道整備は、旅行時間の短縮、車内混雑率の緩和などの効果を評価して進められてきた。その一方、予定した時刻に目的地に到着できるという鉄道サービスの信頼性については定性的な評価に留まっている。しかしLamら¹⁾が示すように、旅客は到着時刻の信頼性が高まることに對して金銭的な支払い意志を有しており、鉄道整備プロジェクトを評価する際に、この効果を便益として考慮することも可能である。

本研究では、鉄道サービスの信頼性を、旅客の損失時間という観点から評価することを試みた。鉄道旅客の損失時間については、データ制約もあり、これまで定量的な検証が全く為されていないのが実状である。そこで本論では、『鉄道運転事故等届出書(平成14年度版)』(以下、鉄道事故統計と記す)をデータ化して事故の定量的分析を行い、シミュレーションを通じて事故に起因する損失時間を推計した。なお本研究では、損失時間の精緻な推計よりも、損失時間の推計方法を構築することを主目的とした。そのためシミュレーションを行った際に、実際の現象を完全に反映していない部分があることを予め明記しておく。

本論の構成は以下の通りである。まず、2章では、交通ネットワークの信頼性に関する既往研究をレビューし、本研究の位置づけを明確にする。3章では、分析に用いたデ

ータの詳細を記す。4章では、事故に伴う運行遅延時間の確率分布の推定方法と、推定した分布から事故の発生件数を推計する方法について説明する。また5章では、シミュレーションで考慮した、事故発生路線と事故発生時間について説明する。6章では、損失時間を推計するシミュレーションの方法、およびシミュレーションの結果を記す。最後に7章で、本研究の成果と今後の課題を記す。

2. 交通ネットワークの信頼性に関する既往研究

本章では、交通ネットワークの特性を考慮して交通システムを評価した既往研究をレビューし、本研究の位置づけを明確にする。

本研究と同様、鉄道ネットワークを分析対象とした研究事例に、Carey²⁾、Higginsら³⁾、Reitveld⁴⁾、村木ら⁵⁾、浅見⁶⁾などがある。

Careyは、公共交通のスケジュールを作成する際に、サービスの信頼性や時刻表の頑健性を考慮することが必要であると述べている。旅行の総費用を、乗車時間と乗継時間、遅延時間/早着時間、出発遅れ時間の合計で表し、これらを確率的に捉え、総費用最小化問題を解くことで信頼性の高い運行ダイヤが作成可能であることを示している。またHigginsらは、列車の遅延の原因を、直接遅延(Direct Delay to Trains)、連鎖遅延(Knock-on Delay)、乗継遅延(Delay due to late connection)に区分して考え、これらを合成して列車の遅延時間の期待値を推定するモデルを構築している。このモデルはクイーンズランド鉄道の時刻表の作成に活用された。一方、Reitveldは、信頼性を到着時間の不確実性と捉え、各交通機関の出発時間と到着時間の確率分布を特定化した上で、各交通機関のLOSを反映させたシミュレーションを行い、トリップの到着時間の分布を特定化している。また信頼性向上の政策オプションを作成し、シミュレーションにより評価している。

これら3編の研究は共に、通常時のサービスの信頼性向上を念頭にいた研究であり、本研究が対象とする運行遅延時間が比較的長時間に及ぶ鉄道事故の発生時に対応す

*キーワード: 鉄道事故, 信頼性, 生存分析, シミュレーション
**正員, 博士(工学), 東京電機大学理工学部建設環境工学科
***学生員, 学士(工学), 東京電機大学大学院理工学研究科
(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂,
TEL:049-296-2911, E-mail:takada@g.dendai.ac.jp)

ることを目的としたものではない。

一方、村木らは、リンク途絶の影響の程度を表す「途絶影響度」を作成し、全国交通幹線網の弱点箇所の抽出を試みている。また浅見らも同様に、一部のリンクが不通になった場合の鉄道ネットワークの信頼性を評価し、代替ルートが存在しない場合や、代替ルートが遠回りである場合には、旅行の一般化費用が上昇して利用者損失が発生し、さらに利用者も減少するということを示している。

本研究では、これら2編の研究と同様、ネットワークの一部のリンクが不通になる事象を扱い、損失時間という視点でネットワークの信頼性を評価する。なお本論では、実際に統計データを用いて、鉄道事故を確率的に扱った点が特徴である。

なお筆者らは、既に鉄道事故の発生状況、事故発生時の運行遅延時間長の確率分布を同定し、シミュレーションによって損失時間を試算している^{7), 8)}。本論で実施したシミュレーションと同一条件下ではないものの、年間735万時間の損失が生じていると試算した。ただし事前の研究では、一日当たりの事故件数の確率分布を求める際に、鉄道事故統計に記録されている事故件数をそのまま用いており、この統計に記録されていない運行遅延時間が30分未満の運転障害事故の発生件数を考慮していないという問題が残されていた。この問題を解決するために、本研究では生存分析の方法を援用して、まず運行遅延時間の確率分布を求め、その確率分布から遅延時間が30分未満の事故件数を算定する方法を考案した。その後、遅延時間が30分以上の事故件数と30分未満の事故件数を合算し、一日当たりの事故の発生件数の確率分布を求めた。

また事故の発生時間を調べると、利用者の多い朝夕に多発していることが判明した。そのため、事前の分析では考慮していなかった事故の発生時間についても、本論では確率的に扱うこととした。

3. データ

本研究では、国土交通省関東運輸局が取り纏めている『鉄道運転事故等届出書（平成14年度版）』を用いて鉄道事故の分析を行った。ただし本研究では『都市交通年報⁹⁾』で定義している首都交通圏で生じた事故を分析対象とした。

当統計には、事故の発生日時、場所、原因、列車の最大運行遅延時間（事故により最も長く停車した列車が、再び運行を開始するまでの時間）、死傷者数等に関する情報が記録されている。この統計では、事故原因が49種類に区分

表-1 事故発生原因の区分

事故原因	例
自殺	
人災	ホーム上で接触、ホームから転落等
車両障害	電気装置、ブレーキ装置等
車両外装置故障	信号故障等
天災	雷害、水害、風害等
踏切外事故	線路内支障、線路内立ち入り等
踏切事故	直前横断、側面衝突等
その他	

されているが、分析の効率性向上のため、本研究ではこれらを表1に示す8種に再区分した。

なお鉄道事故が発生した際に移動が困難となる旅客数は、『大都市交通センサス¹⁰⁾』を用いて算出した。

4. 鉄道事故の発生件数の推定

(1) 鉄道事故統計の不完備について

先述した通り、鉄道事故統計には、人身事故、踏切事故等の鉄道運転事故、および運転遅延時間が30分以上の運転障害事故の事故現況のみが記録されている。そのため、この統計の事故件数をそのまま扱うと、事故件数を過小に評価することになる。そこで本論では、生存分析の方法を援用し、運行遅延時間が30分以上の事故の情報のみを用いて、運行遅延時間の確率分布を求め、その確率分布から運行遅延時間が30分未満の事故件数を算定した。

(2) 運行遅延時間について

未報告の事故件数を、生存分析の解析手法を用いて推計する方法を記す。

なお事前の分析において、運行遅延時間がワイブル分布に従うと仮定してパラメータ推定を行ったが、統計的に有意なパラメータが推定されなかった。よって、ここでは統計的に有意なパラメータが推定された指数分布を仮定した場合の分析結果を記すこととする。

事故に起因する列車の運行遅延時間長 t が、以下の指数分布に従っていると仮定する。

$$f(t) = \frac{1}{\theta} \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad (0 \leq t, 0 < \theta) \quad (1)$$

θ は分布の形状を表すパラメータであり、遅延時間の平均値と一致する。

今、運行遅延時間が30分未満の事故に関するデータがトランケーティッド(truncated)されたと考え、運行遅延時間が30分以上の事故データのみを用いて遅延時間分布を求めることを考える（図1参照）。つまり下側トランケーテ

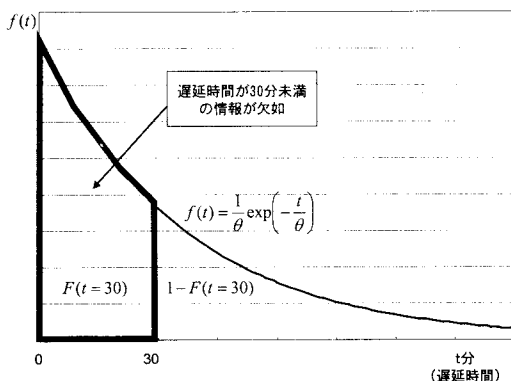


図-1 30分以下で下側ランケーティッドされた分布

表-2 パラメータの推定結果

	データ数	パラメータ	t値	判定
自殺	126	24.1	11.23	**
人災	30	22.6	5.48	**
車両障害	36	33.8	6.00	**
車両外装置故障	21	35.5	4.58	**
天災	21	40.1	5.48	**
踏切外事故	20	39.7	4.47	**
踏切事故	12	31.4	3.46	**
その他	25	29.0	5.00	**

*...有意水準 1% **...有意水準 5%

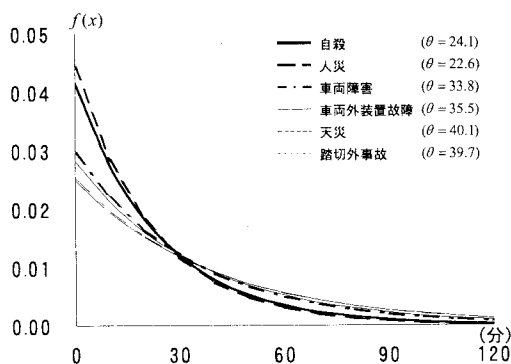


図-2 運行遅延時間の確率密度関数

イッドされた指数分布を用いて (1) 式中のパラメータ θ を推定することになる。

遅延時間が c 以上であるという条件付の遅延時間 t の確率密度は (2) 式で表すことができる。

$$f_c(t) = \begin{cases} \frac{1}{\theta} \exp\left(-\frac{t-c}{\theta}\right) & (c \leq t < \infty) \\ 0 & (0 \leq t < c) \end{cases} \quad (2)$$

(2) 式のパラメータ θ は最尤推定法により推定できる。事故原因別に推定したパラメータと確率密度関数を、それぞれ表 2、図 2 に示す。

表-3 事故件数の算定結果

事故原因	30分未満	30分以上	計	シェア
自殺	311	126	437	0.499
人災	83	30	113	0.129
車両障害	52	36	88	0.101
車両外装置故障	28	21	49	0.056
天災	23	21	44	0.050
踏切外事故	23	20	43	0.049
踏切事故	19	12	31	0.035
その他	45	25	70	0.080
計	584	291	875	1.000

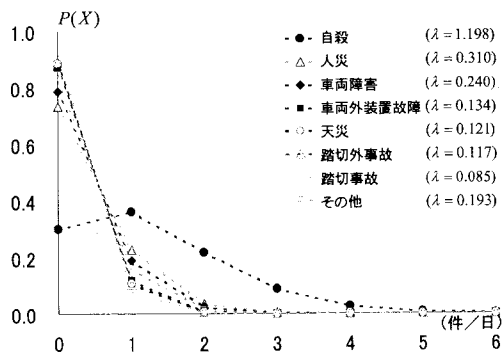


図-3 事故発生件数の確率分布

(3) 事故発生件数について

前節 (2) で推定した運行遅延時間の確率密度関数を用いて、運行遅延時間が30分未満であった事故件数を算定する。推定した確率密度関数より、運行遅延時間が30分以上である確率と30分以下である確率を求め、これらの確率の比と運行遅延時間が30分以上の事故件数から、遅延時間が30分未満の事故件数を求めることが可能である。事故原因別に求めた事故件数を表 3 に示す。

鉄道事故統計によると、運行遅延時間が30分未満であった自殺と人災が原因である事故件数は、それぞれ11件、60件である。よって自殺の事故件数は、かなり過大に推計されたと言える。これは、全事故原因に対して、運行遅延時間が指数分布に従っていると仮定したことが原因であると考えられる。今後、損失時間の精緻化を図る際には、パラメータの信頼性に加えて、分布の適合度が高くなる確率分布を事故原因別に適用することが必要である。

ランダムに発生する事象の単位時間当りの発生回数がポアソン分布に従うことから、ここでは1日当りの事故発生件数がポアソン分布に従うと仮定した。

先に求めた事故原因別の事故件数 (表 3) より1日当りの事故件数 (パラメータ λ) を求めた。事故原因別のパラメータ λ とその分布形を図 3 に示す。

5. シミュレーションで扱った他の事象について

(1) 事故発生路線

路線別の事故の発生件数を表4に示す。また事故の発生場所を図4に示す。ほぼ首都圏全域で事故が発生しており、特に利用客の多い、JR山手線、JR京浜東北線などで事故が多発していることが見て取れる。また代替する路線が十分に整備されていない郊外においても事故が多く発生していることが見て取れる。

シミュレーションでは一様乱数を発生させて、事故の発生路線を決定した。

(2) 事故発生時間

事故発生時間の内訳を図5に示す。始発から午前9時までと、午後5時から終電にかけて、事故が多く発生していることが見て取れる。これらの時間帯は通勤時間、帰宅時間であり、旅客が多いために駅構内で列車との接触事故が起きやすいことが要因と考えられる。

なお本論では、午前5時から午前1時までを2時間毎に区切り、シミュレーションでは一様乱数を発生させて、事故の発生した時間帯を決定した。

表-4 事故発生路線の内訳

路線名	件数	発生確率
JR京浜東北線	63	0.119
JR山手線	40	0.076
JR中央本線	39	0.074
JR常磐線	22	0.042
JR東海道本線	21	0.040
JR横浜線	20	0.038
JR横須賀線	18	0.034
JR宇都宮線	16	0.030
東武東上線	13	0.025
その他	276	0.523

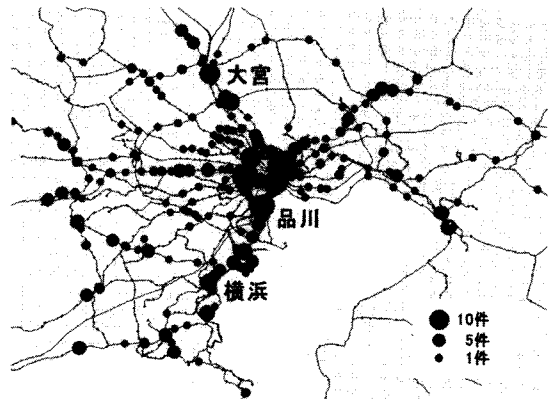


図-4 事故発生場所

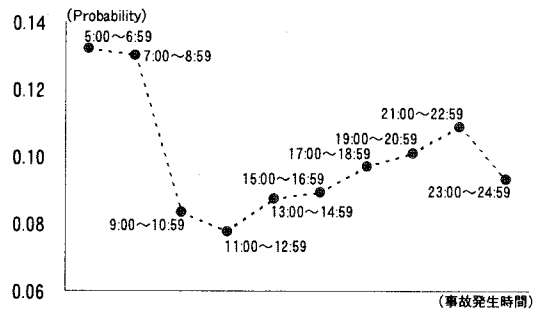


図-5 鉄道事故の発生時間

6. シミュレーションによる損失時間の推計

(1) シミュレーションの前提条件

損失時間の推計に際して設定した条件を以下に記す。

- 事故発生後、旅客は予定した通りの経路でトリップを行うこととした。つまり旅客は、不通区間の迂回行動や、トリップのキャンセルなどは行わないとした。
- 鉄道利用者は、鉄道定期券利用者のみとした。これはデータ制約より止むを得ず設定した条件である。
- 事故の発生確率は全ての駅で同一とした。これは、鉄道事故の記録がない駅においても、将来事故が生じる可能性を反映させるための条件である。
- 事故が発生した路線では、全区間に渡り運行が停止するとした。

(2) シミュレーションのフロー

4章、5章で同定した、鉄道事故に関する様々な事象の確率分布を適用してシミュレーションを行い、旅客の損失時間を推計する。シミュレーションのフローを図6に示す。

以下にシミュレーションのプロセスを記す。

- 1日当りの事故種別の事故件数を、ポアソン分布に従う乱数を発生させて決定する。
- 各事故の発生時間を、一様乱数を発生させて決定する。
- 事故の起こった路線を、一様乱数を発生させて決定する。
- 発生した事故について、事故原因別に同定した指数分布に従う乱数を発生させ、運行遅延時間を決定する。
- 大都市交通センサス（鉄道定期券利用者の利用経路別旅客数）を用いて、事故の発生した路線を利用している旅客数を算出する。
- 運行遅延時間とe)で算出した旅客数を乗じて事故1件当たりの損失時間を算定する。
- シミュレーション実行期間に渡って損失時間を集計する。

なお本研究では、MATLAB (Math Works社)を用いてプログラムを作成した。MATLABはマルチシードの乱数発生器を使用しており、理論的には同じ値を繰り返す前に2の1492乗以上の値を生成することができるとしている¹⁾。よって本研究で行うシミュレーションでは、乱数発生 of 的周期性の問題は生じていないと判断した。

(3) 年間損失時間の推計結果

200年間に渡るシミュレーションを行い、旅客の損失時間の確率分布を同定した(図7)。平均値は4503万時間、標準偏差は363万時間となった。また分布の適合度検定の結果、正規分布に従っていることも検証された。

ちなみに、2003年度の毎月勤労統計調査¹²⁾に基づき、首都圏(1都3県)の勤労者の平均時間評価値を2400円とすると、1年当たり1081億円の時間損失が生じているという結果となった。

7. まとめ

本研究の成果、および今後の研究課題を記す。

本研究では、鉄道事故統計をデータ化し、鉄道事故の発生原因、発生頻度、最大遅延時間に関する分析を行った。鉄道事故の発生件数については、未報告の事故が存在するため、生存分析モデルを適用して未報告の事故件数を算定した。

また鉄道事故に起因する損失時間を推計するシミュレーション実験を行い、損失時間の確率分布を同定することが可能であることを示した。

ただし本論では、損失時間を精緻に求めることよりも、損失時間の推計可能性を検討することに主眼を置いた。

損失時間の推計値を精緻化の為には、

- 1) 旅客の不通区間の迂回行動の考慮
 - 2) 移動困難者のトリップのキャンセル行動の考慮
 - 3) より適切な運行遅延時間分布の設定
 - 4) 一般乗車券購入旅客の移動困難者の考慮
- することが必要である。

なお本研究は文部科学省科学研究費補助金・若手研究(B)「事故・災害時の鉄道ネットワークのリダンダンシー性向上方策に関する研究」の一部として実施したものである。

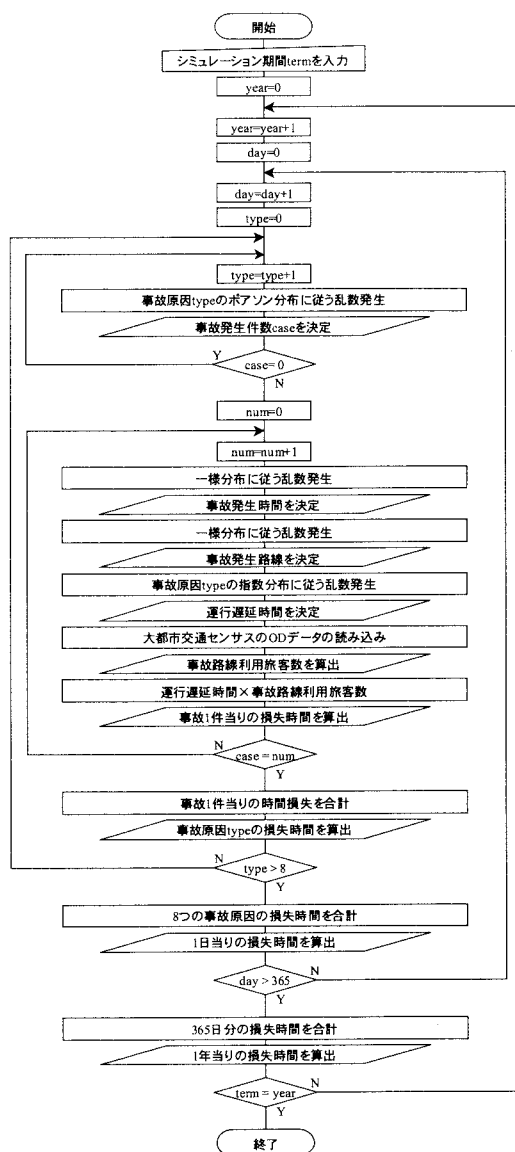


図-6 シミュレーションのフロー

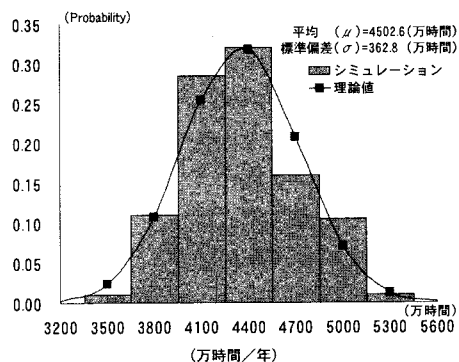


図-7 損失時間の確率分布

謝辞

鉄道事故統計の情報開示請求の際、快くデータを提供して下さった国土交通省関東運輸局総務部総務課に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Terence C. Lam and Kenneth A. Small: The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment, Transportation Research Part E, 37, pp.231-251, 2001
- 2) Terence C. Lam and Kenneth A. Small and Carey, M.: Reliability of interconnected scheduled service, European Journal of Operations Research, 79, pp.51-72, 1994
- 3) Higgins, A., Kozan, E.: Modeling train delays in urban networks, Transportation Science, 32, pp.346-357, 1998
- 4) Rietvel, P., Bruinsma, F.R. and Van Vuuren, D.J.: Coping with unreliability in public transport chains: A case study for Netherlands, Transportation Research Part A, 35, pp.539-559, 2001
- 5) 村木康行, 高橋清, 家田仁: 利用者便益から見た全国幹線交通ネットワークの耐震信頼性評価と耐震性向上による影響分析, 土木計画学研究論文集Vol.16, pp.341-348, 1999
- 6) 浅見均, 日野智, 佐藤馨一: 幹線鉄道ネットワークのインターオペラビリティに関する研究, 土木計画学研究講演集 Vol.24(2), pp.373-376, 2001
- 7) 藤生慎, 吉澤智幸, 高田和幸: 首都圏における鉄道事故の発生と運行停止時間の確率分布の推定, 土木学会第59回年次学術講演会, CD-ROM, 2004
- 8) Takada, T., Yoshizawa, T., and Fujiu, M.: Reliability evaluation of the railway network in the Tokyo metropolitan area, Proceedings of 2nd Inter-national Symposium on Transportation Network Reliability, pp.104-108, 2004
- 9) 国土交通省総合政策局監修: 平成14年版都市交通年報, 財団法人運輸政策研究機構
- 10) 国土交通省: 平成12年版大都市交通センサス, 国土交通省
- 11) MATLAB 6.1 Function Reference Manual
- 12) 独立行政法人労働政策研究・研修機構ホームページ: <http://www.jil.go.jp>

鉄道事故に伴う旅客の損失時間の推計手法に関する研究*

高田和幸**・吉澤智幸***

首都圏では、運行の遅延を伴う鉄道事故が多々発生しており、これらの事故により旅客は多大な時間損失を被っていると考えられる。しかしながら、データ制約もあり首都圏の鉄道旅客の損失時間については、これまで定量的な検証が全く為されていない。そこで本研究では、鉄道事故統計をデータ化し、事故の定量的分析を行った。また分析に特定化した各事象の確率分布を適用してシミュレーションを行い、事故に起因する損失時間が推計可能であることを示した。

Estimation method of traveler's loss of time caused by railway accidents*

By Kazuyuki TAKADA**, Tomoyuki YOSHIZAWA***

Many railway accidents, which cause railway passengers huge waste of time, have occurred every year in Tokyo metropolitan area. Nevertheless, there are no quantitative researches which assess total waste of time because of data constraint. In this paper the railway accident in this region is analyzed and several statistical distributions related to the phenomena of accident are identified. Moreover, statistical simulation with the identified distributions is programmed and the distribution of total waste of time is identified through a simulation experiment.
