

卒業論文

鉄道定常監視システムにおける
故障情報のモデル化と
有効活用

平成19年 2月2日提出

指導教員 酒井信介教授

50241 程島雄造

目次

第1章 序論.....	6
1.1 背景.....	6
1.1.1 緒言.....	6
1.1.2 鉄道定常状態監視システムの概要.....	6
1.1.3 ATS装置について.....	9
1.2 本論文の目的.....	11
1.3 本論文の構成.....	12
第2章 故障情報のスクリーニング.....	14
2.1 緒言.....	14
2.2 インシデント故障表示の特徴.....	14
2.3 アクシデント情報の特徴.....	16
2.4 アクシデント情報とインシデント情報の区分け.....	18
2.5 結言.....	18
第3章 フォルトツリー、イベントツリーによる故障のモデル化.....	19
3.1 緒言.....	19
3.2 フォルトツリー、イベントツリーの概要.....	19
3.3 FTによる故障情報と表示情報のモデル化.....	19
3.4 ETによる故障情報のモデル化.....	22
3.5 表示情報から故障部品の特定.....	23
3.6 実際の故障データによる検証.....	24
3.7 結言.....	24
第4章 ベイズ特定モデルによる故障部品の確率論的決定.....	26
4.1 緒言.....	26
4.2 ベイズ推定法.....	26
4.2.1 ベイズの定理.....	26
4.2.2 ベイズ推定.....	28
4.3 故障部品と故障表示の関係を表すモデル.....	29
4.4 各確率密度関数の設定.....	30
4.4.1 確率変数の確率密度関数の設定.....	30

4.4.2	表示確率の密度関数の設定.....	34
4.5	ベイズの定理による故障表示からの故障部品の特定.....	35
4.6	ベイズ特定モデルの出力方法.....	36
4.7	ベイズ更新によるベイズ特定モデルの精度向上とその検証.....	38
4.7.1	緒言.....	38
4.7.2	与えられるデータの形状とベイズ更新.....	38
(1)	故障確率のベイズ更新.....	38
(2)	表示確率のベイズ更新.....	45
4.7.3	モンテカルロシミュレーションによるベイズ更新の有効性検証.....	49
(1)	緒言.....	49
(2)	モンテカルロシミュレーションのモデル作成.....	49
(2)	事前分布の設定.....	50
(3)	モンテカルロシミュレーションの実行.....	52
(4)	更新結果検証.....	52
(5)	考察.....	57
4.8	結言.....	57
4.9	付録.....	58
第5章 本研究のまとめ.....		60
5.1	緒言.....	60
5.2	故障特定モデル概要.....	60
5.3	データの集積方法.....	61
5.4	今後の課題と展望.....	61
参考文献.....		62
謝辞.....		63

目次

FIGURE 1-1	MONITORING SYSTEM.....	7
FIGURE 1-2	AN EXAMPLE OF MONITOR SIGN	8
FIGURE 1-3	RELATIONS BETWEEN PARTS AND SIGNS	9
FIGURE 1-4	ATSP SYSTEM	10
FIGURE1-5	INSIDE THE ATS IN DETAIL.....	11
FIGURE2-1	RECOVERY TIME OF [符号处理器]SIGN.....	15
FIGURE2-2	RECOVERY TIME OF [EC 間伝送装置故障]SIGN	15
FIGURE2-3	RECOVERY TIME OF [沿線情報伝送装置故障]SIGN	16
FIGURE2-4	RECOVERY TIME OF [中継器故障]SIGN.....	16
FIGURE3-1	FALUT TREE OF ATSP AND MONITORING SYSTEM1	20
FIGURE3-2	FAULT TREE OF ATSP AND MONITORING SYSTEM.....	21
FIGURE 3-3	EVENT TREE OF ATSP AND MONITORING SYSTEM (IN A CASE OF IOM3).....	22
TABLE3-1	RELATIONS BETWEEN SIGNS AND FAILURE PARTS	23
TABLE 3-2	SUITABILITY OF INSPECTION METHOD TO OCCURRED DATAS	24
FIGURE4-1	AN IMAGE OF BAYESIAN THEORY.....	27
FIGURE4-2	BAYESIAN INSPECTION MODEL OF ATSP MONITORING SYSTEM	30
TABLE 4-1	FAILURE RATES OF PARTS	31
	31	
TABLE4-2	PARTS AND CORRESPONDING PARAMETERS OF DIRICHLET DISTRIBUTION	32
FIGURE 4-3	PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF FAILURE RATES (PART 1)	32
	(CP8,IOM3、CP4)	32
FIGURE 4-4	PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF FAILURE RATES (PART2)	33
FIGURE 4-5	PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF FAILURE RATES (PART3)	33
TABLE4-3	RELATIONS BETWEEN MATRIX SIGNS AND RATES OF OCCURRENCES.....	34
TABLE 4-4	MATRIX SIGNS AND CORRESPONDING PROBABILITY DENSITY FUNCTION.....	34
FIGURE4-6	SHAPES OF BFUNCTIONS.....	35
TABLE 4-5	PROBABILITY DENSITY FUNCTIONS OF SIGN PROBABILITIES.....	35
TABLE4-6	COMPARISON OF FAILURE PROBABILITY OF PARTS BEFORE AND AFTER REALIZING FAILURE SIGNS.....	36
FIGURE 4-7	RATES SHOWING RELATIVE CRITICALITY OF PARTS.....	37
TABLE4-7	FAILED PARTS AND CORRESPONDING SIGNS OF ACCIDENTS.....	39
FIGURE4-8	SHIFT OF PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF CP8 FAILURE RATES	39
FIGURE4-9	SHIFT OF PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF IOM3 FAILURE RATES.....	40

FIGURE4-10	SHIFT OF PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF CP4 FAILURE RATES	40
FIGURE4-11	SHIFT OF PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF IOM2 FAILURE RATES.....	41
FIGURE4-12	SHIFT OF PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF SEL FAILURE RATES	42
FIGURE4-13	SHIFT OF PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF LT2 FAILURE RATES.....	42
FIGURE4-14	SHIFT OF PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF LT3 FAILURE RATES.....	43
FIGURE4-15	SHIFT OF PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF OPM FAILURE RATES.....	43
FIGURE4-16	SHIFT OF PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF MOE FAILURE RATES	44
FIGURE4-17	SHIFT OF PROBABILITY DENSITY FUNCTION OF POWER FAILURE RATES	44
FIGURE4-18	SHIFT OF SIGN PROBABILITY FUNCTION P(符号处理器 IOM3).....	46
FIGURE4-19	SHIFT OF SIGN PROBABILITY FUNCTION P(EC 間伝送 IOM3).....	47
FIGURE4-20	SHIFT OF SIGN PROBABILITY FUNCTION P(沿線情報 IOM3)	47
FIGURE4-21	SHIFT OF SIGN PROBABILITY FUNCTION P(中継器 IOM3).....	48
FIGURE4-22	SHIFT OF SIGN PROBABILITY FUNCTION P(中継器全器 IOM3).....	48
TABLE 4-7	TRUE RELATIVE FAILURE RATES USED FOR SIMULATION.....	50
TABLE4-8	TURE SIGN RATES USED FOR SIMULATION.....	50
TABLE4-9	DIRICHLET DISTRIBUTION PARAMETERS OF FAILURE PROBABILITIES.....	51
TABLE4-10	MATRIX SIGNS AND CORRESPONDING SIGN PROBABILITY	51
TABLE4-11	DENSITY FUNCTIONS OF SIGN PARAMETERS	52
FIGURE 4-23	SHIFT OF 95% CREDIBLE INTERVAL OF CP8 FAILURE PROBABILITY FUNCTION.....	53
FIGURE 4-24	SHIFT OF 95% CREDIBLE INTERVAL OF IOM3 FAILURE PROBABILITY FUNCTION.....	54
FIGURE 4-25	SHIFT OF 95% CREDIBLE INTERVAL OF CP4 FAILURE PROBABILITY	55
FIGURE 4-26	SHIFT OF 95% CREDIBLE INTERVAL OF IOM2 FAILURE PROBABILITY	55
FIGURE 4-27	SHIFT OF 95% CREDIBLE INTERVAL OF 「符号处理器故障」 RESULTED FROM CP8 FAILURE.....	56
FIGURE 4-28	SHIFT OF 95% CREDIBLE INTERVAL OF 「EC 間伝送装置故障」 RESULTED FROM CP8 FAILURE.....	56
FIGURE 4-29	SHIFT OF 95% CREDIBLE INTERVAL OF 「沿線情報伝送装置故障」 RESULTED FROM CP8 FAILURE.....	57
FIGURE4-30	BAYESIAN INSPECTION MODEL OF REAL FAILURE AND NOIZE	58
TABLE4-12	COMPARISON OF FAILURE SIGN DATA RESULTING FROM TRUE ERROR AND NOIZE	59
FIGURE 5-1	IMAGE OF BAYESIAN INSPECTION SYSTEM.....	60

第1章 序論

1.1 背景

1.1.1 緒言

これまで最も安全な輸送機関としての地位を守ってきた鉄道であるが、近年その地位を揺るがす多くの事故が起り改めて鉄道システムの信頼性が問われている。

鉄道の安全な運行にあたり車両や線路、通信機器等の状態を把握しておくことは不可欠である。現在東日本旅客鉄道ではこの作業を定常状態監視システムを用いて行っている。このシステムは、沿線の通信機器や踏み切り、架線等の状態を常時センサで監視し、装置の故障が起きた場合には速やかにその故障情報を指令員の常駐するメンテナンスセンターに送る。本来ならばここで送られてくる故障情報を指令員がモニタで常時監視し、必要に応じて現場に保線員を送り事故や遅延を未然に防ぐことが求められている。ところが実際には指令員の判断が遅れ、適切な処理が行われる前に列車が停止し遅延につながるケースが多々起こっている。

指令員の指示が遅れる理由として二つの原因が挙げられる。一つ目は現場のセンサからモニタに送られてくる情報が系統性にかけているという点である。メンテナンスセンターに送られてくる故障情報は一日に一万件にもものぼり、しかも路線、故障部位、故障状況のまったく異なるものが系統性なく時系列的に並ぶ。またそれに加え、このシステムでは故障にはつながらないような小さな現象、(例えば装置に過電流が流れたなど) のような場合でもフェイルセーフの考え方に基づきより故障情報を流す。

二つ目はモニタにあがる故障の表示から保線員に出すべき適切な指示を見つけるまでにエキスパートによる熟練の判断が必要な点である。図1がモニタに上がってくる故障表示の一例であるがこれでは故障の起きている大まかな部位は分かっても、装置のどの部品を準備、交換する必要があるのかが明確でない。

本研究では現在使われているこの定常監視システムにおけるエキスパートの判断方法を整理するとともに、新たにベイズ統計学に基づいた故障部位の特定方法の提案とその評価を行う。

1.1.2 鉄道定常状態監視システムの概要

定常監視システムは、鉄道沿線上にある信号装置、架線、通信機器、踏み切り等の設備をセンサにより常時監視し、故障等異常事態が発生すると指令員が

管理しているモニタに故障情報を送る一連のシステムを指す。

定常監視システムでは故障情報は以下のような手順で取り扱われる。

- ① 沿線上の装置が故障を起こすと付随したセンサが故障情報をキャッチしメンテナンスセンターへ故障情報を送る
- ② メンテナンスセンターで送られてきた情報を時系列的にモニタに表示する。モニタには故障発生の時間、路線名、場所、装置名が表示される（表示例を Fig1-2 に載せる）故障が起こると「発生」の表示が上がる。
- ③ 指令員がモニタの表示を参考に経験に基づき故障原因を予測し現場に保線員を送る。
- ④ 現場で復旧作業を行い、装置が回復するとセンサが回復を読み取りメンテナンスセンターのモニタに「回復」の表示を上げる。現場で復旧作業を行わなくてもひとりで「回復」表示が上がってしまう場合もある。

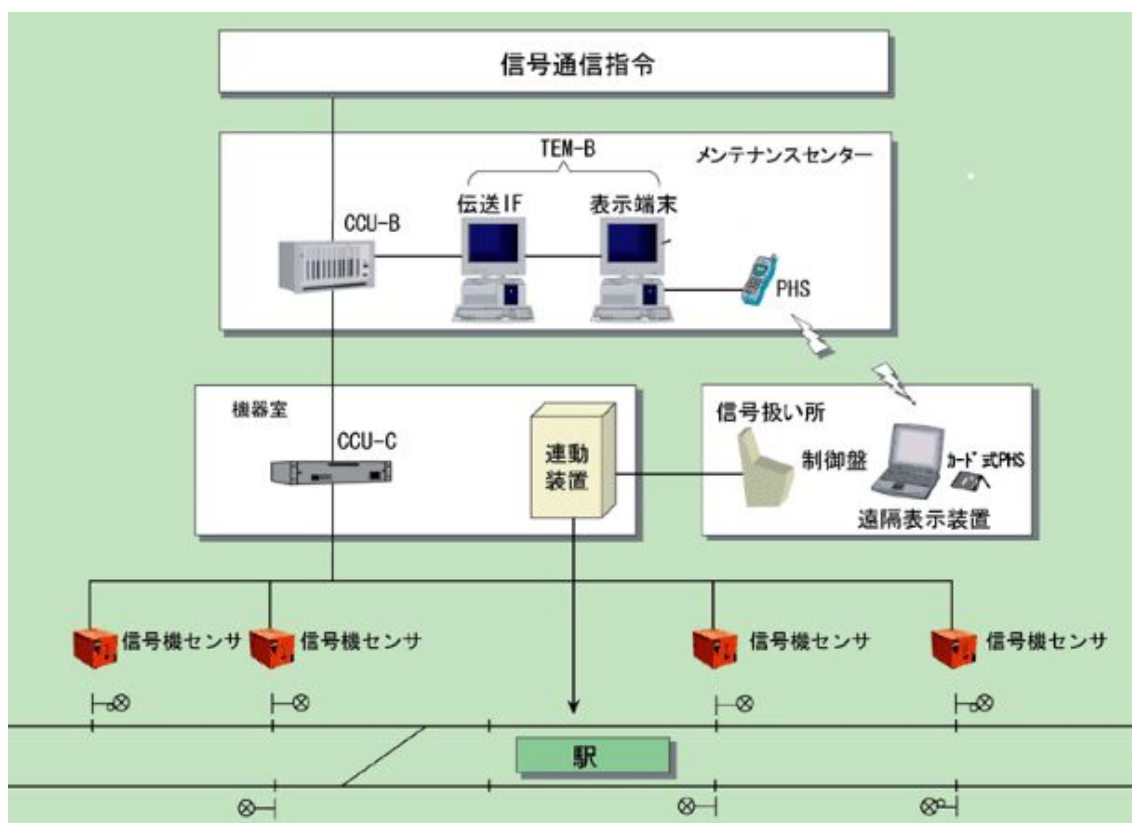


Figure 1-1 Monitoring system

山手貨	渋谷	接点21	転落下り動作	渋谷(山貨)	発生	M04	
山手貨	渋谷	接点21	転落下り動作	渋谷(山貨)	回復	M04	
中央緩行	荻窪	AGT3	電列停C	列非上り動作	荻窪(中央緩行)	発生	M04
中央緩行	荻窪	AGT3	電列停C	列非上り動作	荻窪(中央緩行)	回復	M04
中央急行	新宿	AGT4	新宿MRH	SMET	自システム外又は軌道回路故障(遠隔モニタ確認)	発生	M04
中央急行	新宿	AGT4	新宿MRH	SMET	自システム外又は軌道回路故障(遠隔モニタ確認)	回復	M04
中央急行	新宿	AGT4	新宿MRH	SMET	自システム外又は軌道回路故障(遠隔モニタ確認)	発生	M04
山手	新宿	AGT3A	山線支C2	転落動作	新宿 山電内(12#)	発生	M04
山手	新大久保	新大久保SH	列防動作(-括)			発生	M04
山手	新大久保	新大久保SH	列防動作	新宿 内(12番線列防SPR)		発生	M04
山手	新宿	AGT3A	山線支C2	転落動作	新宿 山電内(12#)	回復	M04
山手	新大久保	新大久保SH	列防動作(-括)			回復	M04
山手	新大久保	新大久保SH	列防動作	新宿 内(12番線列防SPR)		回復	M04
中央急行	新宿	AGT4	新宿MRH	SMET	自システム外又は軌道回路故障(遠隔モニタ確認)	回復	M04
中央急行	新宿	AGT4	新宿MRH	SMET	自システム外又は軌道回路故障(遠隔モニタ確認)	発生	M04
中央急行	新宿	AGT4	新宿MRH	SMET	自システム外又は軌道回路故障(遠隔モニタ確認)	回復	M04
中央緩行	四ツ谷~信	AGT4	電上1500R	電上1500R入力電源不良		発生	M04
中央緩行	四ツ谷~信	AGT4	電上1500R	電上1500R予備給電		発生	M04
中央緩行	信濃町	AGT4	西00D電上1700R	信濃町西00D1号停電		発生	M04
中央急行	新宿	AGT3	新宿SRH	扱所UPS入力異常		発生	M04
中央緩行	信濃町~千	AGT4	電上1800R	電上1800R入力電源不良		発生	M04
中央緩行	信濃町~千	AGT4	電上1800R	電上1800R予備給電		発生	M04
中央緩行	千駄ヶ谷	AGT4	東00D電下900R	千駄ヶ谷東00D1号停電		発生	M04
中央緩行	千駄ヶ谷	AGT4	電下700R	電下700R入力電源不良		発生	M04
中央緩行	千駄ヶ谷	AGT4	電下700R	電下700R予備給電		発生	M04
中央緩行	千駄ヶ谷	AGT4	電下6西00D旅客案内	千駄ヶ谷西00D1号停電		発生	M04
中央緩行	代々木~新	電下1電上250800R30A		電0800R入力異常		発生	M04
中央緩行	代々木~新	電下1電上250800R30A		電0800R予備給電		発生	M04
中央緩行	代々木	AGT4	電下2000R	代々木00R入力電源不良		発生	M04
中央緩行	代々木	AGT4	電下2000R	代々木00R予備給電		発生	M04
中央急行	新宿	AGT4	新宿MRH	SG(急行)自システム外又は信号機故障(遠隔モニタ確認)		発生	M04
中央緩行	四ツ谷	AGT4	電下14・西00D	四ツ谷西00D1号停電		発生	M04
中央緩行	代々木	AGT3	代々木支障C	代々木00D1号停電		発生	M04
中央急行	四ツ谷~新	AGT4	急上1000R	上1000R入力電源不良		発生	M04
中央急行	四ツ谷~新	AGT4	急上1000R	上1000R予備給電		発生	M04

Figure 1-2 An example of Monitor sign

本来ならば以上の手順により復旧作業が行われるべきであるが、実際にはこのシステムは有効に使われておらず、指令員がモニタに上がる表示を見逃して遅延事故につながってしまうケースが少なくない。これには二つの原因がある。

① モニタを指令員が1日監視し続ける困難

モニタに上がってくる故障情報が一日に5000件から10000件と多い。しかもその多くが表示は上がってはいても復旧作業は必要としない、いわゆる「誤情報」である。そのため人の手で常時監視するのは困難である。

② 故障表示から故障した部品を特定する困難

指令を出す際に必要な情報は「どの部品が故障しているか」という情報であり、扱うのはFigure1-3の①、②等部品単位である。一方モニタに上がってくる表示は部品を包括する装置の名前であり、Figure1-3のA、B、C等である。A、B、Cは複雑に入り組み、それぞれがどこまでを包括するのか曖昧であるため上がってきた表示と「どの部品が故障しているか」という情報を得るのが難しい。

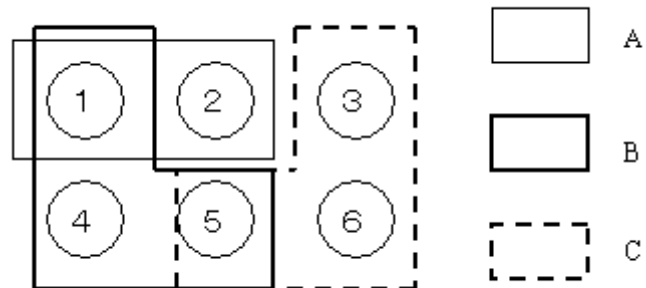


Figure 1-3 relations between parts and signs

1.1.3 ATIS 装置について

ATIS は自動列車停止装置の略であり運転士が停止信号を無視して進行したり、誤認したときに自動的にブレーキを動作させて衝突や脱線事故を未然に防ぐために設けられるバックアップ的な設備である。

今回の研究で扱うトランスポンダ式 ATIS（以下 ATSP）の仕組みを以下に解説する。

ATSP は大きく信号機、符号処理器、中継器、車上子からなる。Figure1-3 のように信号機の表示情報は符号処理器を通して沿線上の中継器に送られる。信号機の表示が「停止」であるときに中継器の上を列車が通った場合、列車上に設置されている車上子に流れている電流の周波数を中継器が変周させる。その結果変周された車上子が運転室内に警報を鳴らし列車が自動的にブレーキをかける。以上がこの装置の基本的な仕組みである。

これに付随する装置として EC 間伝送装置、沿線情報伝送装置がある。EC 間伝送装置は各信号機に取り付けられている符号処理器同士をつなぎ近所の信号機情報を交換する役割を果たす。また沿線情報伝送装置は沿線上の様々な情報を駅処理装置から受け取り各符号処理器に送る。符号処理器は信号機から送られてくる情報に加え、これら二つの伝送装置により送られた情報をも含めて中継器に信号情報を流す。

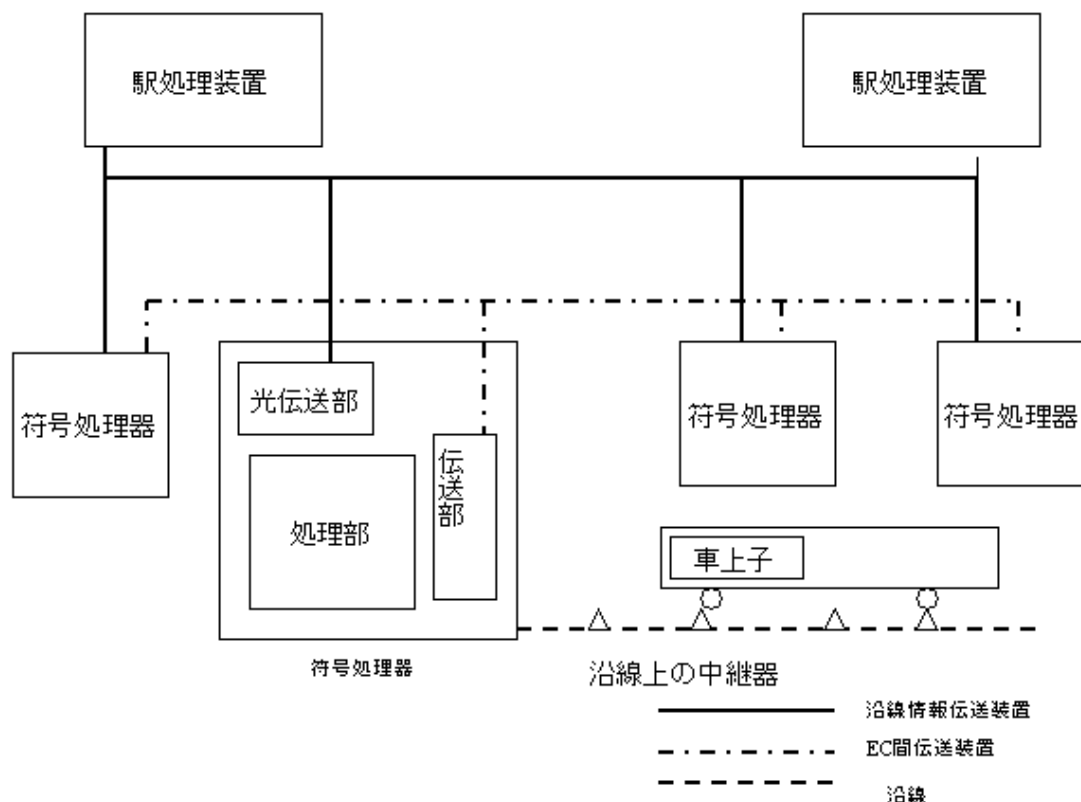


Figure 1-4 ATSP system

また符号処理器は数多くの部品で構成されており Figure1-4 のようになっている。

異常が発生した場合、保線員は Figure1-3, Figure1-4 の個々の部品の単位、すなわち CP8、IOM3、SEL、中継器などの単位で交換、復旧作業を行う。それに対して異常発生時に定常監視システムのモニタに上がるのは「符号処理器故障」「EC 間伝送装置故障」「沿線情報伝送装置故障」「中継器故障 no.x」と大雑把な単位であり、これらは Figure1-4 のように部品を包括するように設定されていることになっている。ところがこの包括範囲は曖昧であり必ずしも範囲通りに表示があがる保証はない。

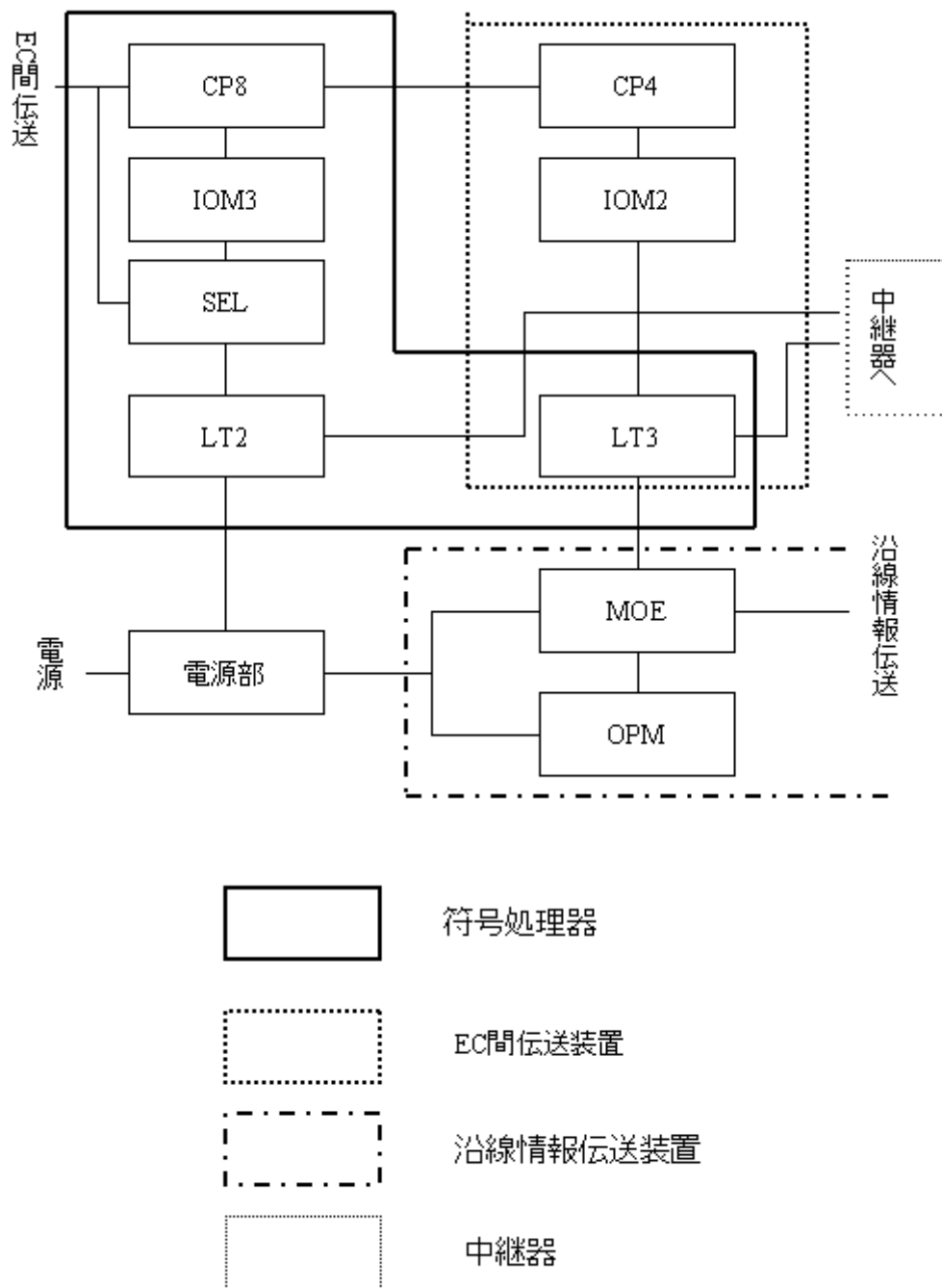


Figure1-5 Inside the ATS in detail

1.2 本論文の目的

現在の定常監視システムは豊富な故障情報を扱いつつも、指令員に最適に提供できていない。この問題点を解消するために2点の目的を挙げる。

- ① モニタに上げる情報から復旧作業の必要がない「誤情報」を省く

- ② モニタにあがる表示の「装置単位の情報」から故障している指令に必要な「部品単位の情報」を引き出し、表示が上がった際に復旧、交換すべき部品の優先順位をしめす。

1.3 本論文の構成

本論文は本章も含めて全6章から構成される。以下に各章の概要を示す。

第2章 故障情報のスクリーニング

①の目的を達成するためにモニタに上がる危険性の低い情報を減らすことを行う。危険性の高い情報と低い情報では表示が「発生」から「回復」に至る時間が異なる点に着目して分類した。

第3章 FTA、ETAによる故障情報のモデル化

②の目的を達成するためには表示情報の装置単位の情報と部品単位の情報をつなぐ必要がある。同時に定常監視システムを俯瞰的に捉えるため遅延事故の起こるプロセスも整理する必要がある。そのためフォルトツリーアナリシス (FTA)、イベントツリーアナリシス (ETA) と呼ばれる手法を用いて情報のモデル化を行った。これにより上がってきた表示から故障部品を決定論的に行うことが可能になる。

第4章 ベイズ特定モデルによる故障表示情報から故障部品の特定

3章の作業で決定論的な故障部品特定は行えるようになったが背景でも述べたように装置単位の情報と部品単位の情報との関係は曖昧である。このため部品の特定は決定論的ではなく確率論的に行う必要がある。3章で作成させたモデルにベイズ手法を取り入れて表示情報と故障部品を確率を用いて関係付けるモデルへと改良した。この作業でモニタに発生表示が上がった際にそれぞれの部品の故障している可能性の度合いを数値で表現できるようになる。

またここで作成したモデルの精度を高める作業も行う。今後の遅延事故で集積される情報もベイズ特定モデルに反映させることによってデータが集まるにつれてより実物に即したものとなる。

第5章 本研究のまとめ

2～4章で作成した特定方法をまとめる。特定方法の手順、本方法を有効に更新させるためにはどのような観点から情報を集めたらよいかについて提案する。

参考文献

謝辞

(本研究は東日本旅客鉄道株式会社と共同で行われた)

第2章 故障情報のスクリーニング

2.1 緒言

本章では序章で挙げた目的①、「モニタに上げる情報から復旧作業の必要がない「誤情報」を省く」を達成させる。

定常監視システムのセンサはATS装置に流れる電流値、電圧値の以上を検知してモニタに故障情報を送るかどうかが判断する。そのためATS装置の故障には直接つながらないような小さなエラー（例えば装置に一瞬過電流が流れた等）が起きた場合でもモニタに故障表示が上がってしまう。

これはフェイルセーフの考え方に乗っ取れば妥当ではあるが、同時に現在の定常監視システムがモニタに送る故障表示情報が人の手で処理できないほど多いという問題につながっている。

本章ではこのような問題点を踏まえ、モニタに上がってくる故障表示情報のうち直接故障にはつながらないと考えられる情報の特徴をつかみモニタから削除することを検討する。

以下の節に入る前にここでモニタに上がってくる故障表示情報で直接故障につながらないものをインシデント情報、故障につながる可能性のあるものをアクシデント情報と定義する。

2.2 インシデント故障表示の特徴

インシデント情報とアクシデント情報を区別する指標として各情報の回復時間が利用できないかを本節で検討した。4ヶ月間（2006年6月～9月）にモニタに上がってきた故障表示情報のうちインシデント情報を分析してみた。表示ごとの回復時間のヒストグラムを以下に示す。

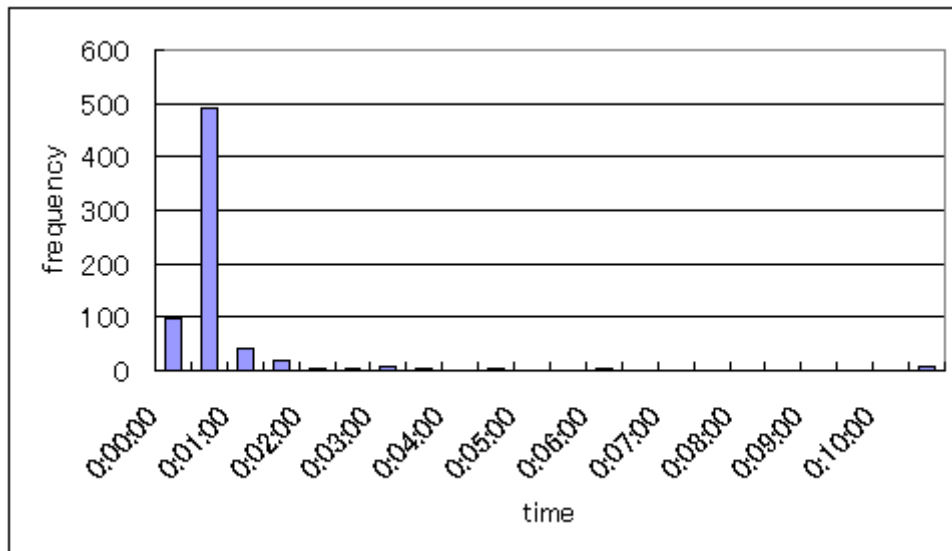


Figure2-1 Recovery time of [符号处理器]sign

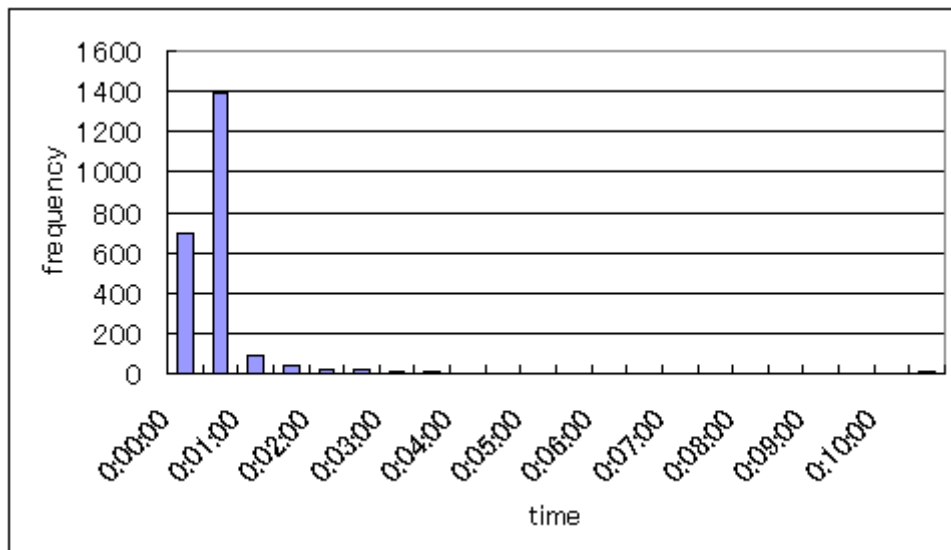


Figure2-2 Recovery time of [EC 間伝送装置故障]sign

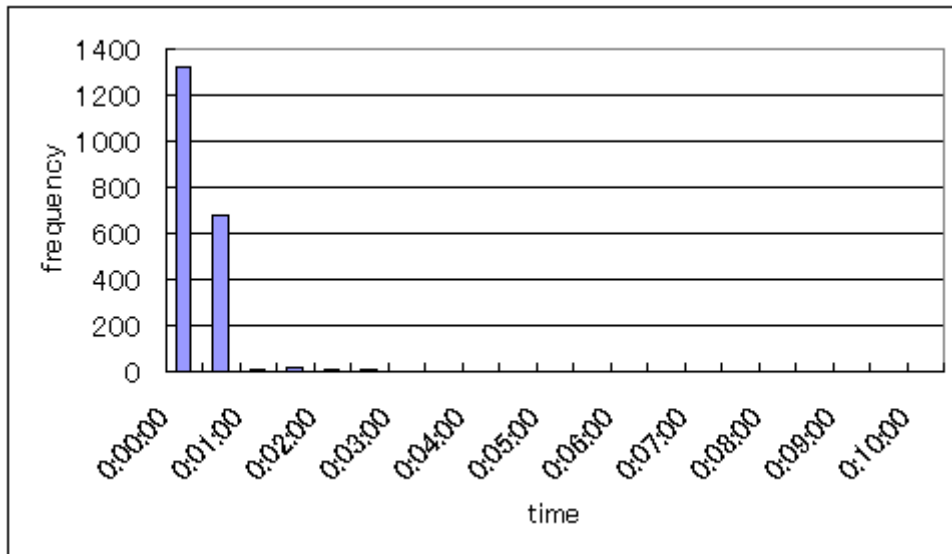


Figure2-3 Recovery time of [沿線情報伝送装置故障]sign

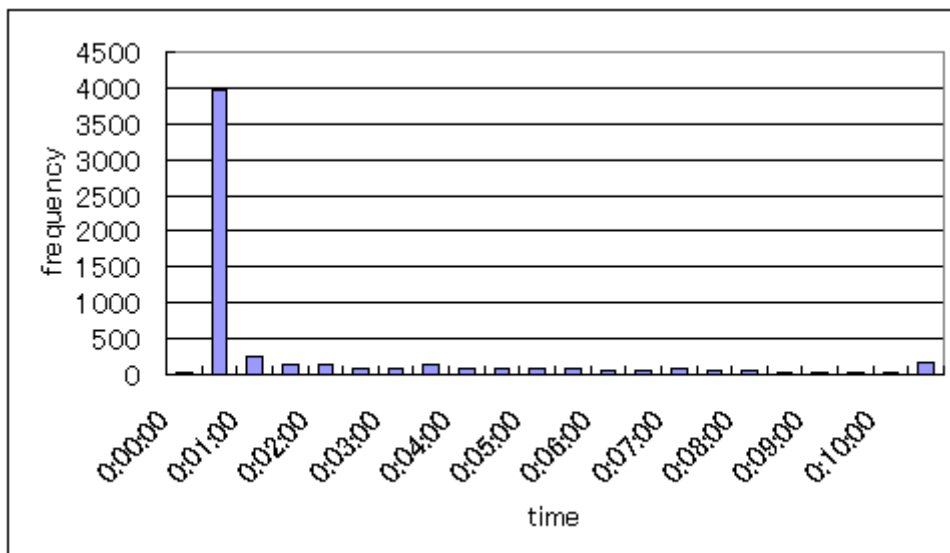


Figure2-4 Recovery time of [中継器故障]sign

以上のヒストグラムから各装置におけるインシデント情報の回復時間が読み取れる。ここで注目すべきはどの故障表示においても95%近い数のデータが回復時間一分以内に密集していることである。

2.3 アクシデント情報の特徴

これに対して今度はアクシデント情報の分析を行う。アクシデント情報はインシデント情報に比べ格段に数が少ないのでヒストグラムは作らず4ヶ月間のログデータのアクシデント情報の回復時間を一件一件調べていく。

2006年6月

2件

- 表示情報：EC間伝送装置故障
状況：短時間回復の故障表示が590件
- 表示情報：符号処理器故障、中継器故障
状況：現場復旧作業までの90分間回復せず

2006年7月

0件

2006年8月

4件

- 表示情報：符号処理器故障
状況：現場復旧作業までの60分回復せず
- 表示情報：符号処理器故障
状況：短時間回復の故障表示が3400件
- 表示情報：符号処理器故障、中継器全器故障
状況：現場復旧作業まで110分回復せず
- 表示情報：符号処理器故障、中継器故障
状況：現場復旧作業までの50分回復せず

2006年 9月

6件

- 表示情報：符号処理器故障
状況：12分で回復
- 表示情報：符号処理器故障、中継器故障
状況：80分で回復
- 表示情報：符号処理器故障、中継器故障
状況：1分で回復
- 表示情報：中継器全器故障
状態：短時間回復を500件
- 表示情報：符号処理器故障
状態：短時間回復を900件
- 表示情報：符号処理器、遅れてEC間伝送装置故障
状態：60分で回復

2006年 10月

0件

これらの情報と事故情報とを照らし合わせるとアクシデント情報は現場で復旧

作業が完了するまで回復しない、あるいは短時間で回復する情報が100件以上発生している。

2.4 アクシデント情報とインシデント情報の区分け

以上で分析してきたアクシデント情報とインシデント情報の区分けを行う。ヒストグラム表を参照すると各装置の表示情報の90パーセントは符号処理器で60秒、EC間伝送装置で60秒、沿線情報伝送装置で30秒、中継器故障で6分以内に回復している。これらの回復時間を基準回復時間と呼ぶこととする。一方アクシデント情報の回復時間は現場作業を行わない限り回復しない、あるいは稀ではあるが激しく発生回復を繰り返す。そこで基準回復時間に基づいて区分けを行うこととする。

表示名 [□]	符号処理器故障	EC間伝送装置故障	沿線情報伝送装置故障	中継器故障 [□]
回復時間閾値 [□]	60秒 [□]	60秒 [□]	30秒 [□]	360秒 [□]

Table2-1 Filtering parameter of recovery time

2.5 結言

アクシデント情報とインシデント情報の区別がついたのでTable2-1基準回復時間を下回る故障表示情報はモニタにあげないこととする。これによってインシデント情報の表示件数が10分の1に減り、目的①はほぼ達成されたとみなしてよい。

ただし短時間で回復する表示が数多く続く場合にアクシデントであるケースもまれにあるため短時間回復でも一時間以上立て続けに繰り返した場合には注意が必要である。今後の展望としてこのような連続的短時間回復表示が発生する原因を探り、正常情報と区別する方法を探る必要がある。

第3章 フォルトツリー、イベントツリーによる故障のモデル化

3.1 緒言

②の目的を達成するためには表示情報の装置単位の情報と部品単位の情報をつなぎ合わせる必要がある。また本装置について研究を進める上で定常監視システムによる故障検知についても整理する必要がある。そのためフォルトツリーアナリシス (FTA)、イベントツリーアナリシス (ETA) と呼ばれる手法を用いて情報のモデル化を行う。モデル化に際しては東日本旅客鉄道の提供するATSのブロック図や現場で用いている復旧マニュアルを活用した。

3.2 フォルトツリー、イベントツリーの概要

フォルトツリー分析法 (以下 FT) は起きてほしくない出力イベントの原因を論理的に辿り、因果関係を明確にする手法である。ある望ましくない出力イベントを出発点として、その出力イベントを引き起こす原因となる入力イベントを枝分かれした先に羅列表記していく。これを繰り返すことにより各イベントの原因が明らかになる。また枝分かれの部分は AND ゲートや OR ゲートを用いて表現する。AND ゲートは原因となる入力イベントが同時に起こったときのみ出力イベントが起こる場合を、OR ゲートは原因となる入力イベントのいずれか一つでも起これば出力イベントにつながる場合を表す。

これに対しイベントツリー分析法 (ET) は原因となる入力イベントを出発点としてそのイベントを原因として起こりうる出力イベントを枝分かれした先に羅列していくものである。

3.3 FT による故障情報と表示情報のモデル化

本節では 3.3 で挙げたフォルトツリー解析法により故障情報を整理する。整理する情報とその因果関係は東日本旅客鉄道の現場復旧マニュアルと ATS システムの概要図、ブロック図に従う。以下の手順で行った。

- ① 出発点となるイベントは今回扱う ATS システムの最大の役割である列車制御機能が不能となることである。このイベントを Figure3-1 の左端にプロットする。
- ② 列車制御不能となるためには機器の故障が起こりその故障情報がモニタに上がらない、あるいは表示が上がっても指令員がその表示を見落としてしまう場合である。これを先のイベントから OR ゲートで枝分かれした先に羅列する。
- ③ 指令員が表示を見落とした場合、その表示はどの表示だったのかを見るため

再度場合分けを行う。

- ④ 最後に故障表示と故障部品の関係付けを行う。Figure1-3, Figure1-4 の図や東日本旅客鉄道の資料などから各故障表示のカバーする故障部品が大まかに把握できる。それらを各故障表示の下に Figure3-2 のように枝分かれして示した。

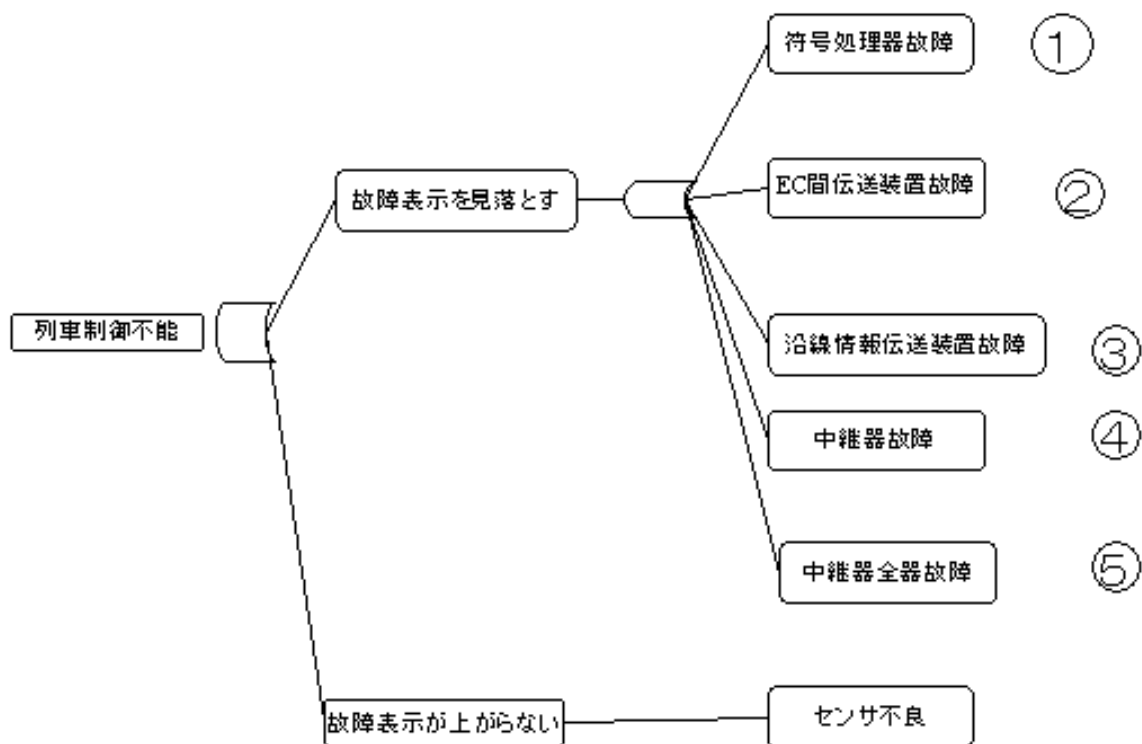


Figure3-1 Falut tree of ATSP and monitoring system1

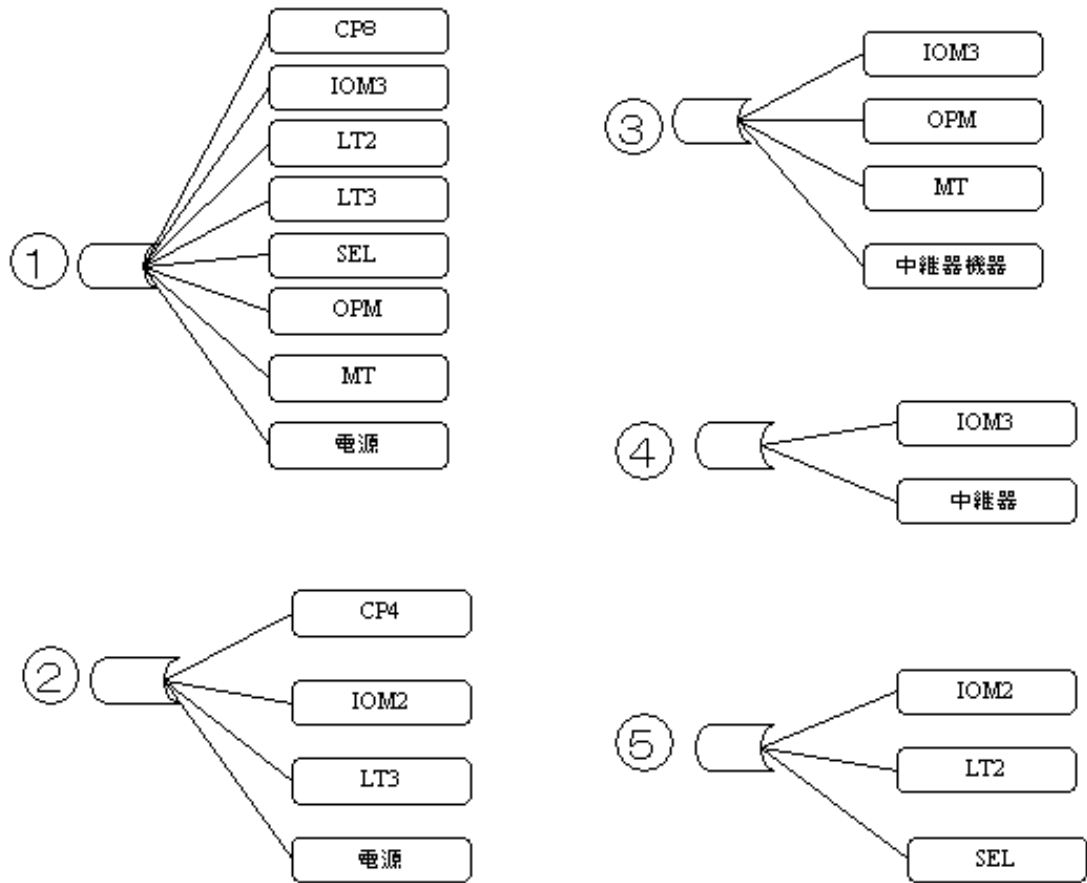


Figure3-2 Fault tree of ATSP and monitoring system
 (These nodes will be attached to Fig3-1 nodes of corresponding numbers)

3.4 ET による故障情報のモデル化

次に 2-1 で挙げた ET により各故障部品を出発点としてそれがどのようなイベント、表示につながるかを分析してみた。

ATS の部品の一つである IOM 3 を出発点とした ET を Figure 3-3 に示す。IOM 3 の故障は符号処理器系の装置全体に悪影響を及ぼし符号処理器を機能不全にする危険性をはらんでいる。同時に IOM 3 の故障は「符号処理器故障」、「中継器故障」の表示をモニタに上げることにもつながる。この作業を ATS を構成するすべての部品に対して行う。

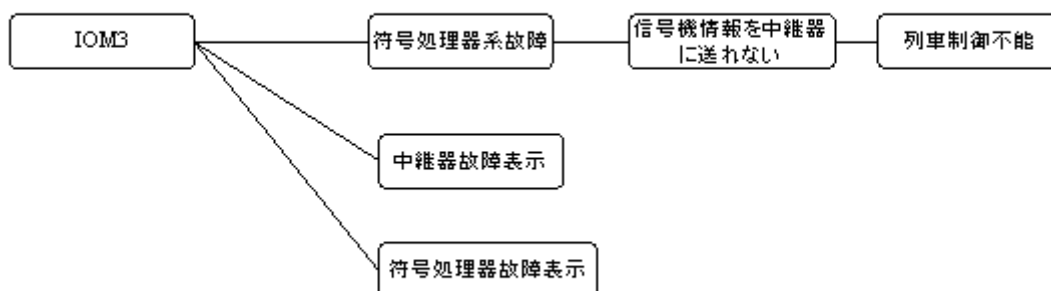


Figure 3-3 Event tree of ATSP and monitoring system (in a case of IOM3)

3.5 表示情報から故障部品の特定

以上の FT,ET により各部品が故障したときにどの表示が上がるかが Table3-1 のように整理される。

	符号処理器(EC)	中継器	中継器全器	EC 間伝送装置	沿線伝送装置
CP4				○	
CP8	○				
IOM2			△	○	
IOM3	○				△
LT2	○		△		
LT3	○			○	
SEL	○		△		
OPM	○				○
MT ブロック	○				○
ケーブル	○				○
中継器装置	△	○			
電源	○			○	○

○ : ブロック図、現場マニュアル両方から判断できる因果関係

△ : ブロック図、現場マニュアルのいずれかからのみ判断できる因果関係

Table3-1 Relations between signs and failure parts

次に Table3-1 を視点を変えて読む。前節では各部品の故障に対してどの故障表示が上がるのかという視点からこの表を取り扱った。本節では逆に上がった故障表示からどの部品が故障しているかという視点から取り扱う。例えば「符号処理器」の表示が単独で上がるケースは CP8 故障時、LT2 故障時、SEL 故障時の 3 通り考えられる。一方「符号処理器故障」とともに「EC 間伝送装置故障」の表示が上がっていた場合 LT3 が故障していると判断できる。このようにこの表を読む視点を変えることによって上がる故障表示のパターンごとに故障している部品の候補を特定できる。以下に表示パターンに対応した故障部品を列挙する。

故障表示パターンから故障部品の特定

符号処理器 (EC) 単独表示	CP8 IOM3 SEL LT2
EC 間伝送装置単独表示	IOM2 CP4
沿線情報装置単独表示	ORM MTブロック ケーブル
中継器単独表示	中継器装置
符号+中継全の両方表示	LT2 SEL
符号+EC 間の両方表示	LT3 CP8 IOM2 CP4
符号+沿線の両方表示	IOM3 CP8 OPM ケーブル MT ブロック
中継全+EC 間の両方表示	CP4 IOM2 LT3
中継全+沿線の両方表示	OPM MTブロック ケーブル
EC+沿線の両方表示	IOM3 CP8 LT2 LT3 SEL OPM MTブロック
符号+EC+沿線のすべて表示	電源

3.6 実際の故障データによる検証

前節で作成した故障表示パターンから故障部品の特定方法が実際の遅延事故の際に当てはまるかどうかを検証した。データは 2-3 に掲載した過去の故障のうち原因が文書化されているものを用いる。過去のデータと 3.5 で作成した特定方法が適合するかどうかについて Table3-2 に示した。

故障表示	故障部品	適合性
EC 間伝送装置故障	IOM2	○
符号処理器故障	CP8	○
符号処理器、中継器故障	IOM3	○
符号処理器、中継器故障	中継器装置	○
符号処理器、中継器故障	中継器装置	○
符号処理器故障	MTブロック	×
符号処理器故障、EC 間伝送装置故障	IOM2	○

Table 3-2 Suitability of Inspection method to occurred datas

以上のように本特定方法はかこの事例に対してほぼ適用可能であるとみなしてよい。

3.7 結言

以上により定常監視システムの表示と故障している部品のモデル、対応付け

が作成された。これにより故障表示が上がった際にどのような現象が起きているのかが整理され、故障が疑われる部品の候補を決定論的に挙げるができる。次の章では列挙された部品の故障が疑われている度合いを数値で表し、確率論的な故障原因の特定を試みる。

第4章 ベイズ特定モデルによる故障部品の確率論的決定

4.1 緒言

前章までで FTA、ETA により故障表示情報から故障部品の特定がある程度行えるようになった。しかしここまでは、故障している可能性のある機器を羅列する決定論的な特定に留まる。また2章で行った回復時間によるスクリーニングを行っても依然としてインシデント情報が数多くモニタに上がってくる。そこで本章ではより細かく故障している部品を特定するために故障表示が上がったとき相対的にどの装置が故障している確率が高いのかを割り出すことを行う。

以下のような手順で行った。

1. 故障している部品と故障表示の関係を表すモデルを作成
2. 故障している部品はどれかを表す確率分布、部品が壊れたときに表示が上がる確率分布を与える。
3. ベイズの定理に2. で求めた確率値を代入し、故障表示が上がったときにどの部品が故障しているかを表す確率を求める。

また後半では2で与えた確率分布を今後蓄積されていくデータにより更新する作業を行う。

具体的な作業に入る前に本章で中心的な役割を担うベイズ推定法について次節で解説する。

4.2 ベイズ推定法

4.2.1 ベイズの定理

ベイズの定理とはあるデータ D が存在し、それを説明する仮説 H が n 個存在する Figure4-1 のような場合(すなわち H が $H_1 \sim H_n$ をとりうる場合)、どの仮説 H が正しいのかを確率論的に推測する定理である。

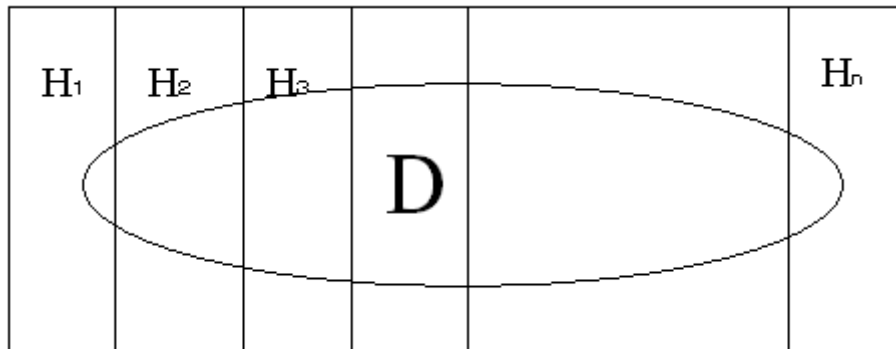


Figure4-1 An image of Bayesian Theory

まず以下の①～④のように用意される確率密度関数を用意する。

- ① $P[H_i]$: $H = H_i$ である確率密度関数
- ② $P[D | H_i]$: $H = H_i$ であるときに D が生起する条件付確率密度関数
- ③ $P[H_i | D]$: D の発生を把握した上で $H = H_i$ が正しい確率密度関数
- ④ $P[H_i, D]$: $H = H_i$ でありかつ D が生起する同時確率密度関数

条件確率の定義式

$$P[H_i, D] = P[D | H_i]P[H_i] = P[H_i | D]P[D]$$

によりベイズの基礎式 (4-1) が成立する。

$$P[H_i | D] = \frac{P[H_i]P[D | H_i]}{P[D]} \quad (4-1)$$

また $P[D] = \sum_{i=1}^n P[H_i]P[D | H_i]$ であるから (4-1) は (4-2) のようにも書くことができる。

$$P[H_i | D] = \frac{P[H_i]P[D | H_i]}{\sum_{i=1}^n P[H_i]P[D | H_i]} \quad (4-2)$$

仮説 H が $H = \theta$ として連続的な値をとりうる場合は (4-3) のように書ける。

$$P[\theta | D] = \frac{P[\theta]P[D | \theta]}{\int P[\theta]P[D | \theta]d\theta} \quad (4-3)$$

この式により D が生じたかどうかを把握した上でどの仮説 H が正しいのかを表す確率密度関数を求めることができる。

4.2.2 ベイズ推定

ベイズ推定とは (4-2) や (4-3) のベイズの定理を応用して H 、 θ を推定する作業を指す。まずベイズの定理をベイズ推定で使いやすいように変形する。(4-3) の分母は θ に依存しないため定数とみなすことができるので (4-5) が成り立つ。

$$P[\theta | D] \propto P[D | \theta]P[\theta] \quad (4-5)$$

ベイズ推定においては θ が未知であるから、 $P[\theta]$ を未知母数 θ の事前確率分布、 $P[\theta | D]$ を D が与えられたときの θ の事後確率分布と呼ぶ。これらをつなぐ $P[D | \theta]$ は前節では条件付確率密度関数と呼んだが、今回は D が既知であり、 D を説明する θ に関する尤もらしさを表すものであるから尤度関数と呼ぶ。

ベイズ推定の手順は以下の3段階からなる。

- ① 事前分布の設定
- ② 新しく入る情報を使ったベイズの定理による更新
- ③ 事後分布の利用

① 事前分布の設定

事前分布はデータが入ってくる前の分布であるから任意に設定することができる。ところが全く自由に設定してしまうと、ベイズの定理を用いて事後分布を作成するときに複雑な計算となる。そこで事前分布を与えられた尤度に対して入ってくるデータと同じ分布族に属する自然共役分布に設定すると都合が良い。このように設定する事前分布を自然共役事前分布と呼ぶ。

② 新しく入る情報を使ったベイズの定理による更新

集められたデータを用いて尤度関数を作成し、(4-5) に代入して事後分布を求める。

③ 事後分布の利用

ベイズ更新を行った後の事後分布関数は更新前に比べより現実に即した

ものとなっている。

4.3 故障部品と故障表示の関係を表すモデル

本章では故障部品（CP8、IOM3、CP4、IOM2、SEL、LT2、LT3、OPM、MOA、電源装置）と5種類の表示（符号処理器（EC）故障、EC間伝送装置故障、沿線情報伝送装置故障、中継器故障、中継器全器故障）からなるモデルを作成する。3章で作成したFTの図を基にして以下のように作成する。

まずモデルの上側に故障部品のノードを設置する。故障部品の確率変数 H を定め（CP8、IOM3、CP4、IOM2、SEL、LT2、LT3、OPM、MOE、電源、中継器機器）の12種類の値をとりうるようにする。モデルの下には故障表示（符号処理器故障、EC間伝送装置故障、沿線情報伝送装置故障、中継器故障、中継器全器故障）のノードを設置する。故障表示の確率変数 D_i は1または0、すなわち表示が起きているか起きていないかの2種類の値をとりうる。

次にこのモデルでは、故障部品のノードと故障部品と故障表示を結びつけるコネクタに確率密度関数を与える。前者は各部品の故障の起こりやすさを示し、「故障確率」と呼ぶ。后者は部品が故障を起こしたときの表示の上がりやすさを表し、「表示確率」と呼ぶ。

本モデルが構造上FTのモデルと異なる点が2点ある。1つ目はFTにはあった頂上事象が省略されている点である。今回は故障部品と故障表示の関係のみを見ることが目的であるため頂上事象を割愛した。2つ目は全ての故障表示が全ての故障部品と対応付けられていることである。本モデルではたとえ結びつきがないと考えられている表示、故障部品間にも僅かな結びつきの可能性を残しておいてある。これは5章で行う確率更新作業で今まで見落としていた結びつきを発見し修正する余地を残しておくためである。

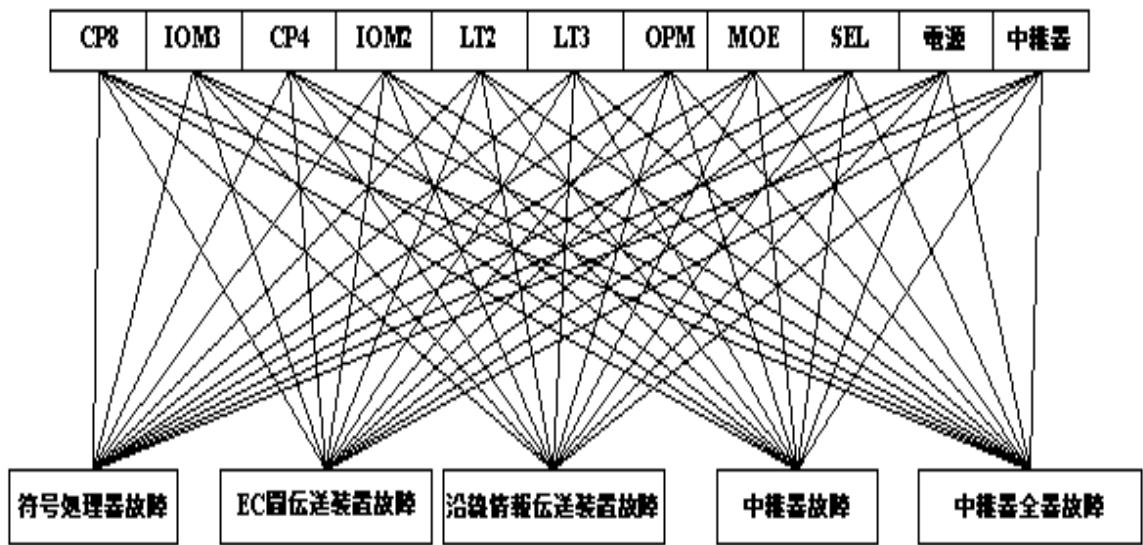


Figure4-2 Bayesian Inspection model of ATSP monitoring system

4.4 各確率密度関数の設定

4.4.1 確率変数の確率密度関数の設定

はじめに確率変数 H のとりうる値の確率密度関数を設定する。この確率密度関数は故障情報の表示を考慮に入れないときにどの装置が故障している可能性が高いのかを示すものである。

与える確率密度関数の形状はディリクレ分布とした。これは次章で述べる確率密度関数の更新作業を容易にするためである。ディリクレ分布は多項分布の形で与えられる更新データと共役であるため更新が行いやすいという利点がある。

$$f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\alpha}) = \frac{1}{b(\boldsymbol{\alpha})} \prod_{i=1}^k x_i^{\alpha_i - 1} \quad (4-1)$$

実数ベクトル $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k)$: H のとりうる確率変数を示す。

パラメータベクトル $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_k)$: 確率変数のベクトルに対する多項分布のパラメータ

次に各部品の故障率を用いてディリクレ分布のパラメータを決定する。ここで故障率とはいっせいに使用を開始した部品である時間まで正常に機能していたもののうち、次の単位時間に故障するものの割合を指す。以下に

ATS 装置の各部品の故障率を掲載する。

N O.	The names of the parts	Failure Rates (x10 ⁻⁹)	数 n	n λ
1	CP8-A(RF8383A)	7704.20	1	7704.2
2	IOM3-A(RF8365A)	4263.40	1	4263.4
3	CP4-A (RF8281A)	5700.60	1	5700.6
4	IOM2-A(RF8297A)	4267.40	1	4267.4
5	SEL-A(RF8362A)	4281.40	1	4281.4
6	LT2-A(RF8363A)	1759.60	1	1759.6
7	LT3-A(RF8374A)	799.6	1	799.6
8	OPM-A(RF8325A)	4143.80	1	4143.8
9	MOE-A (RF8330A)	2077.20	1	2077.2
11	AC/DC power	3000.00	4	12000

Table 4-1 failure rates of parts

今回のモデルでは 11 種類の部品の故障率を用いてディリクレ分布のパラメータを与える。今後の更新していくデータに対して今回与える分布関数は 10 件分の重みを持っているとして以下のように求められる。

$$\alpha_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4-2)$$

$$f(\bar{x}, \bar{\alpha}) = \frac{1}{B(\bar{\alpha})} \prod_{i=1}^k x_i^{\alpha_i} \quad (4-3)$$

(4-2)、(4-3) を用いて Table4-1 から α_i を求めると以下のようになる。

部品名	パラメータ
CP8	1.88
IOM3	1.04
CP4	1.39
IOM2	1.04
SEL	1.04
LT2	0.43
LT3	0.2
OPM	1.01
MOE	0.51
電源	0.73
中継器機器	0.73

Table4-2 parts and corresponding parameters of Dirichlet distribution

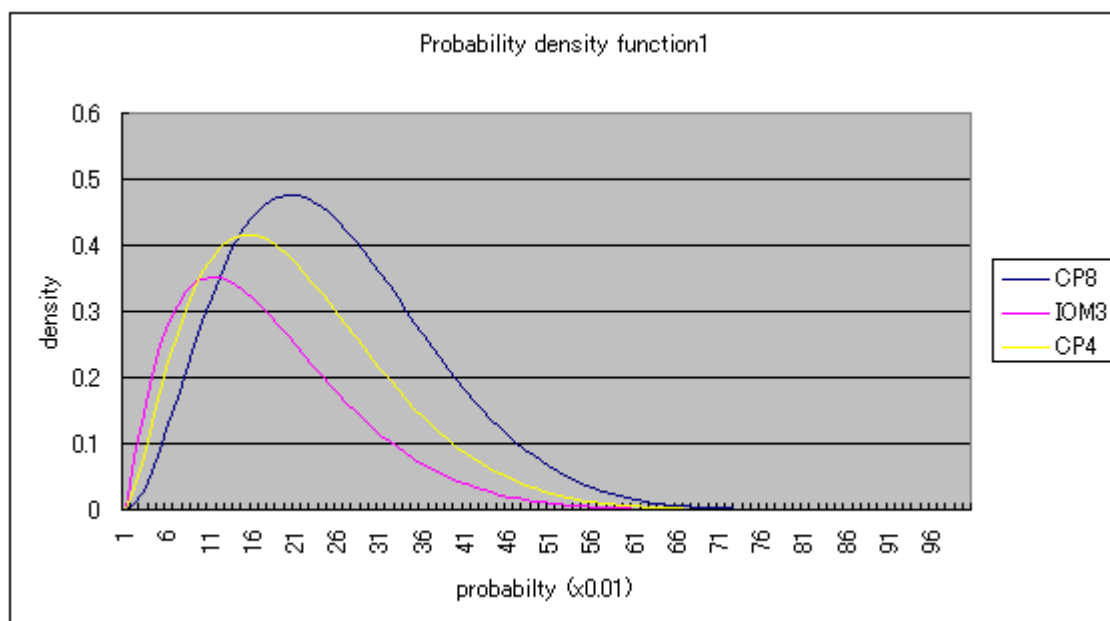


Figure 4-3 Probability density function of failure rates (part 1)
(CP8,IOM3、CP4)

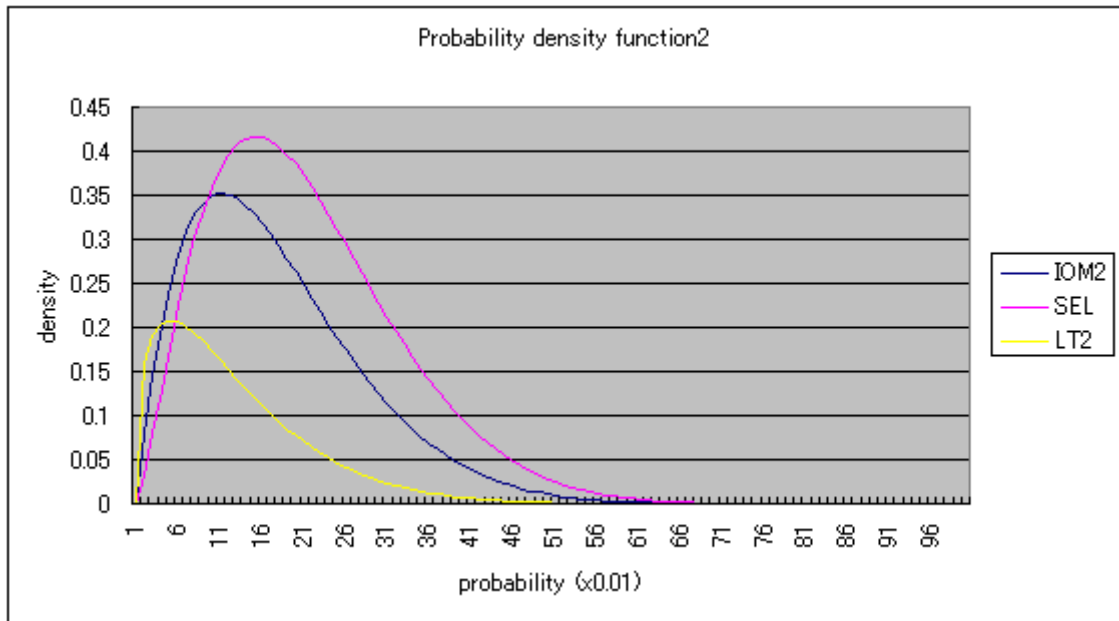


Figure 4-4 Probability density function of failure rates (part2)
(IOM2、SEL、LT2)

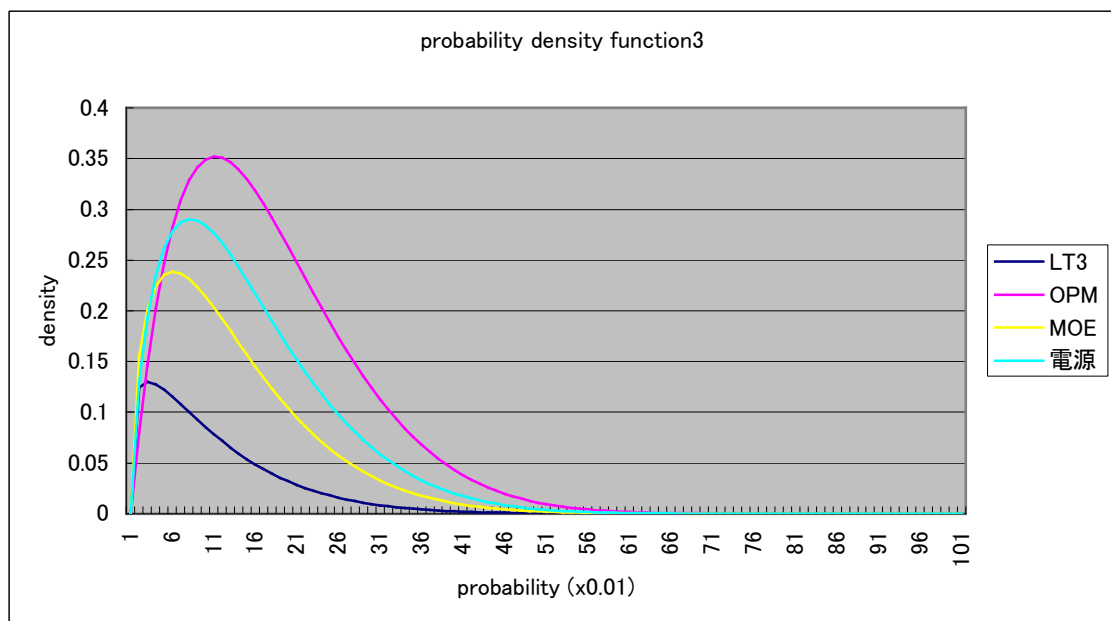


Figure 4-5 Probability density function of failure rates (part3)
(LT2、OPM、MOE、電源)

4.4.2 表示確率の密度関数の設定

次に表示確率の確率密度変数を設定する。これは部品が故障したときに表示が発生する部分確率の密度関数である。この密度関数を設定する際に問題なのは変数 H のとりうる確率分布を設定したときに用いた故障率のような明確なデータが存在しない点である。そこで Table3-1 Relations between signs and failure parts のマトリクスを参考にして Table4-3 のように主観的にデータを与えてみた。

マトリクスの表示	発生確率
○	90%
△	80%
無印	10%

Table4-3 Relations between Matrix signs and rates of occurrences

以上に与えた発生確率が期待値になるような確率密度関数の設定をする。

このとき留意しなければならないのが次章で説明する確率分布関数の更新である。今後データが集積されていくにつれて今回与えた確率分布関数を更新していく予定である。集積されていくデータは二項分布の形をとるので、その際更新がしやすいように二項分布と共役なベータ分布に設定する。また今回主観的に設定した確率分布は今後集積されてくるデータ 3 件分の重みがあるとし、Table4-4 のような密度関数を設定した。これらの密度関数の形状を Figure4-5 に示した。

マトリクスの表示	確率密度関数ベータ分布
○	$Be(\alpha, \beta)=2.7,0.3$
△	$Be(\alpha, \beta)=2.4,0.6$
無印	$Be(\alpha, \beta)=0.3,2.7$

Table 4-4 Matrix signs and corresponding probability Density function

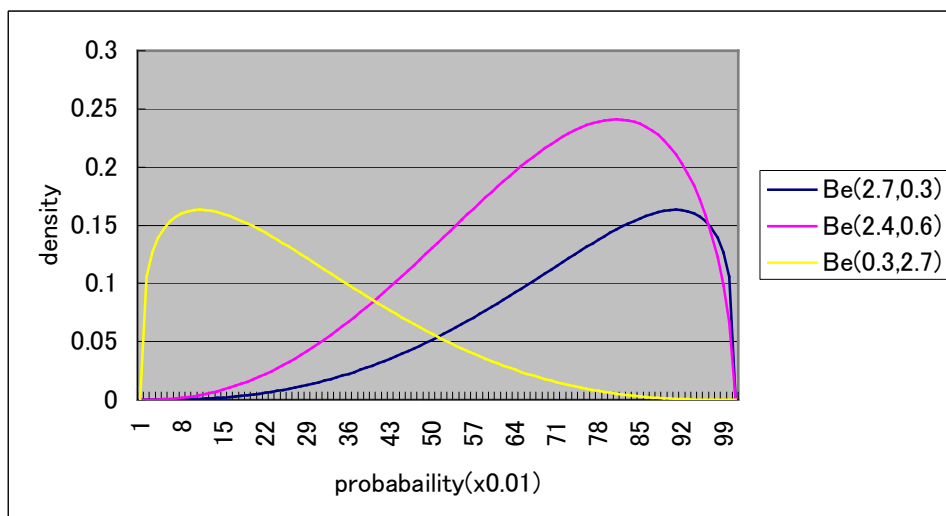


Figure4-6 Shapes of β functions

これらの基準に従い今回のモデルの確率密度関数を設定すると Table4-5 のようになる。縦軸に確率変数 H の値、横軸にそのとき上がる故障を示す。

	符号処理器	中継器	中継器全器	EC 間伝送装置	沿線情報伝送装置
CP8	Be(2.7,0.3)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)
IOM3	Be(2.7,0.3)	Be(2.7,0.3)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(2.4,0.6)
CP4	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(2.7,0.3)	Be(0.3,2.7)
IOM2	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(2.4,0.6)	Be(2.7,0.3)	Be(0.3,2.7)
SEL	Be(2.7,0.3)	Be(0.3,2.7)	Be(2.4,0.6)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)
LT2	Be(2.7,0.3)	Be(0.3,2.7)	Be(2.4,0.6)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)
LT3	Be(2.7,0.3)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(2.7,0.3)	Be(0.3,2.7)
OPM	Be(2.7,0.3)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(2.7,0.3)
MOE	Be(2.7,0.3)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(2.7,0.3)
power	Be(2.7,0.3)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(2.7,0.3)	Be(2.7,0.3)
中継器装置	Be(2.4,0.6)	Be(2.7,0.3)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)	Be(0.3,2.7)

Table 4-5 Probability density functions of sign probabilities

4.5 ベイズの定理による故障表示からの故障部品の特定

最後に前節で求めた確率をベイズの定理に代入して、上がった故障ごとの故障している部品の確率を求めることができる。最終的に目的とするのは分布関数を求めることではなく、どの部品が壊れているかの故障確率を求めることで

ある。よってベイズの定理には分布関数そのものではなく分布関数の期待値を代入する。4章で挙げたベイズの基礎式は以下の(4-4)のように書くことができる。

$$p(H_k | \vec{D}) = \frac{p(\vec{D} | H_k)p(H_k)}{\sum_{i=1}^{10} p(\vec{D} | H_i)p(H_i)} \quad (4-4)$$

ここで $p(H_i)$ は故障確率変数ごとの確率密度関数の期待値、 $p(\vec{D} | H_i)$ が表示確率分布関数の期待値である。本式により、 \vec{D} を把握したときにどの部品が故障しているかを示す事後の故障確率 $p(H_k | \vec{D})$ が求まる。

例として表示が $\vec{D} = (1,0,0,1,0)$ の場合、(4-4) を利用すると Table4-6 のようにして求まる。Table4-6 には参考として、表示 D を把握する前の故障確率を載せた。

部品名	初期の故障確率	表示把握後の故障確率
CP8	0.188	0.260912212
IOM3	0.104	0.137322217
CP4	0.139	0.027464443
IOM2	0.104	0.035311427
SEL	0.104	0.027464443
LT2	0.043	0.058852379
LT3	0.02	0.029426189
OPM	0.101	0.147130947
MOE	0.051	0.073565473
電源	0.073	0.102991663
中継器機器	0,073	0.099558607

Table4-6 Comparison of failure probability of parts before and after realizing failure signs

4.6 ベイズ特定モデルの出力方法

本モデルを実用化したら、出力確率を Figure4-6 のように表示すると各部品の危険度が把握しやすい。

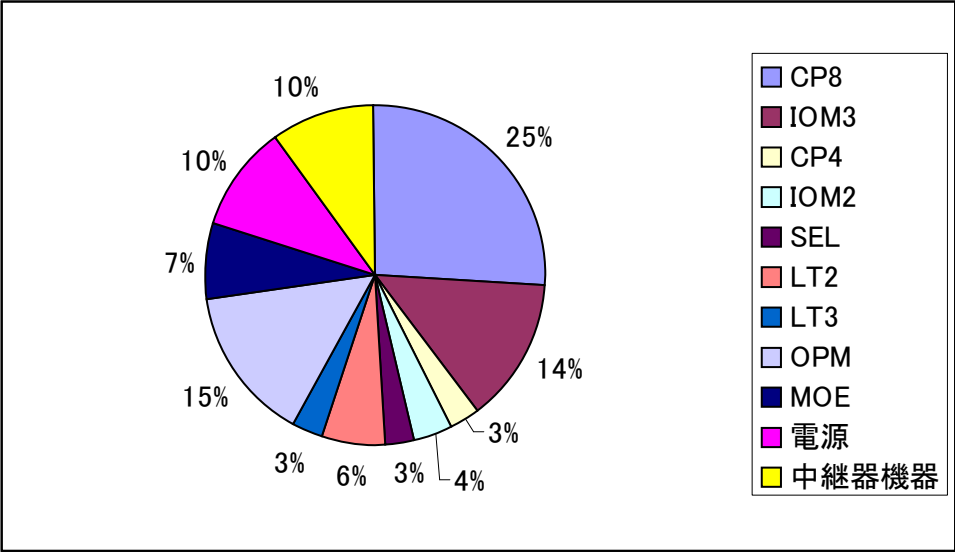


Figure 4-7 Rates showing relative criticality of parts

4.7 ベイズ更新によるベイズ特定モデルの精度向上とその検証

4.7.1 緒言

ベイズ特定モデルを作成するに当たり、各部品の故障率を用いて部品故障の多項分布を、故障部品特定マトリクスを用いて表示の β 分布を作成した。ところがここで作成した分布は大いに主観を取り入れて作成したものであるため真値であるかは疑わしいところである。この問題点を解消するために本節では今後蓄積されていくデータを用いて与えた事前分布をベイズ更新していく作業を行う。

4.7.2 与えられるデータの形状とベイズ更新

(1) 故障確率のベイズ更新

故障確率の確率密度関数の初期分布はディリクレ分布として設定した。この密度関数を更新するために1ヵ月ごとに各部品の故障した個数のデータを集める。集められたデータは多項分布(4-5)の形状をとる。例えば1ヶ月の間にCP8が2回、IOM3が1回、CP4が0回、IOM2が1回故障したとすると、多項分布は(4, 6)の形で与えられる。

$$\Pr[n, x_1, \dots, x_k; p_1, \dots, p_k] = \frac{n!}{x_1! \dots x_k!} \prod_{i=1}^k p_i^{x_i} \quad (4-5)$$

$$\Pr[11; 2, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0; p_1, \dots, p_k] = \frac{11!}{2!1!0!1!0!0!0!0!0!} \prod_{i=1}^{11} p_i^{x_i} \quad (4-6)$$

この式は X_i の観測値を得たときの p_i の尤度関数とみなすことができ、 X_i が既知であり p_i が未知である。この多項分布を用いてディリクレ分布(4-1)を更新する。更新はベイズの基礎式から以下の式のようになされる。

$$\Pr[x_1, \dots, x_{11}; \overline{\alpha}_1, \dots, \overline{\alpha}_{11}] \propto \Pr[11; x_1, \dots, x_{11}; \alpha_1, \dots, \alpha_{11}] \Pr[x_1, \dots, x_{11}; \alpha_1, \dots, \alpha_{11}] \quad (4-7)$$

α_i : 更新前のディリクレ分布パラメータベクトル成分

$\overline{\alpha}_i$: 更新後のディリクレ分布パラメータベクトル成分

ちなみに上の式を用いて更新を行う他に、ディリクレ分布と多項分布が共役

であるという性質を利用して以下のように多項分布の x_i を更新前のパラメータベクトルの各成分に加えることによっても更新が可能である。

$$\Pr[x_1, \dots, x_{11}; \alpha_1, \dots, \alpha_{11}] \rightarrow \Pr[x_1, \dots, x_{11}; \alpha_1 + x_1, \dots, \alpha_{11} + x_{11}] \quad (4-8)$$

(α_i は初期のディリクレ分布のパラメータ成分、 x_i は多項分布成分)

ベイズ更新は連続利用が許されるため、毎月集積されてくるデータを尤度関数として繰り返しかけていくことで初期のディリクレ分布が更新されていく。

過去の事故データで故障表示と故障部品の対応付けができていた 7 件を用いて実際に更新を試行した。

故障部品	符号処理器	EC 間伝送装置	沿線情報伝送装置	中継器	中継器全器
CP8	○				
IOM2		○			
IOM3	○			○	
中継器装置	○			○	
中継器装置	○			○	
MOE	○				
IOM2	○	○			

Table4-7 Failed parts and corresponding signs of accidents

June>September 2006

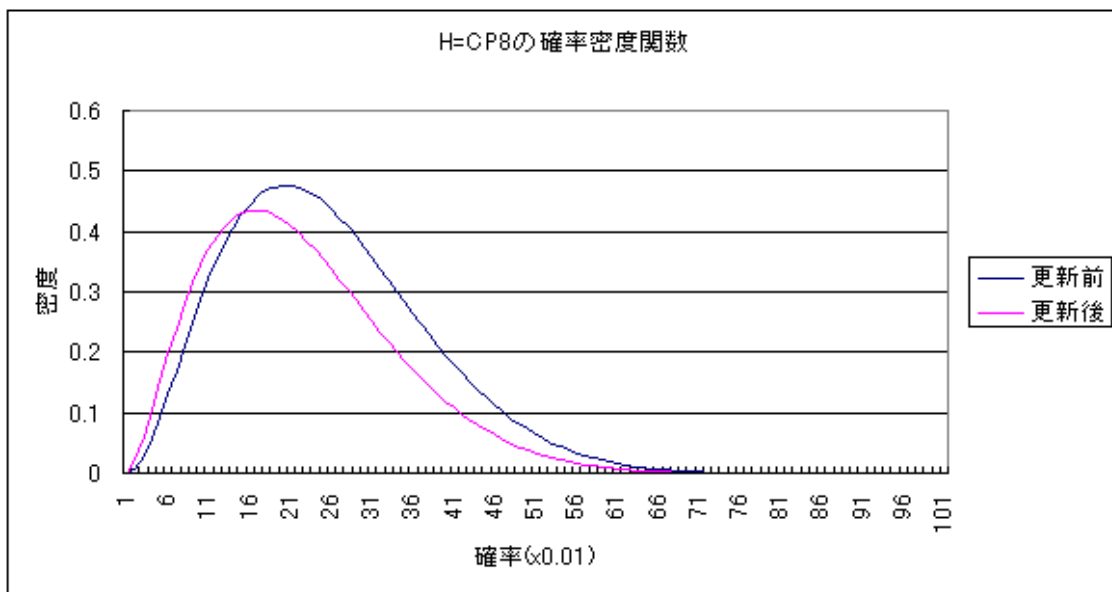


Figure4-8 Shift of probability density function of CP8 failure rates

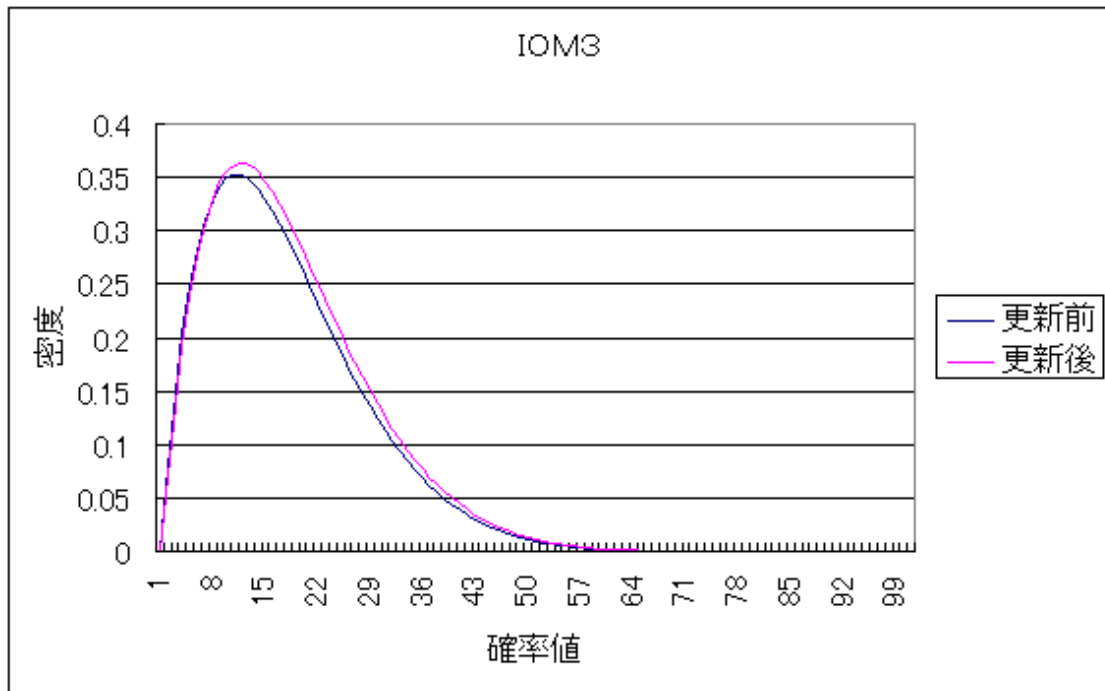


Figure4-9 Shift of probability density function of IOM3 failure rates

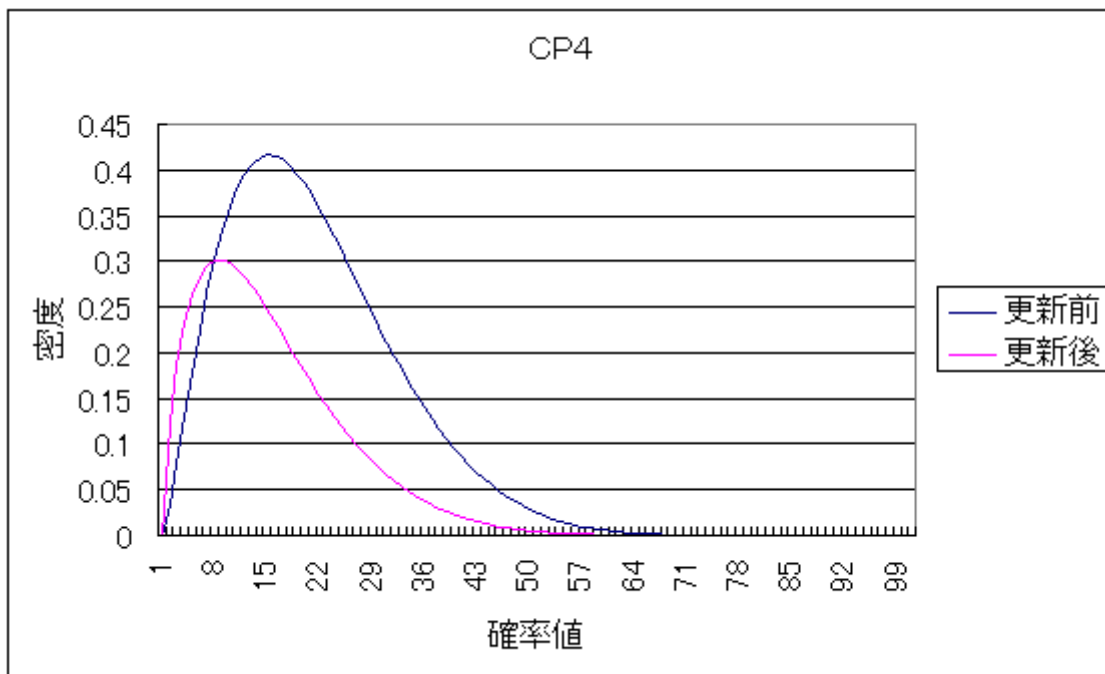


Figure4-10 Shift of probability density function of CP4 failure rates

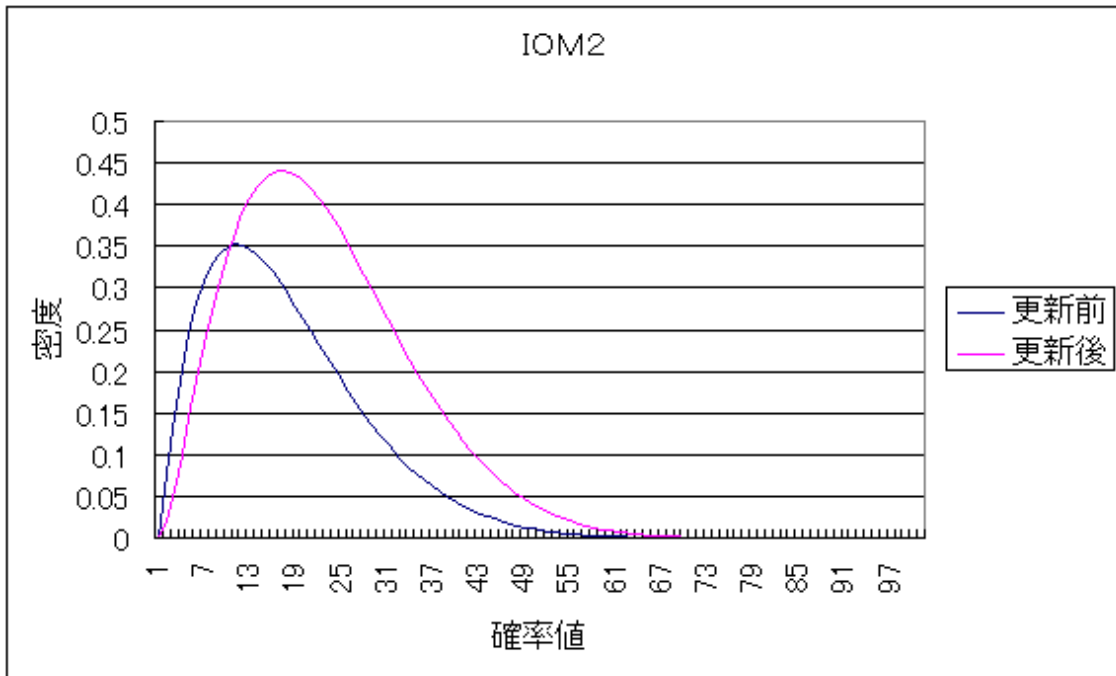


Figure4-11 Shift of probability density function of IOM2 failure rates

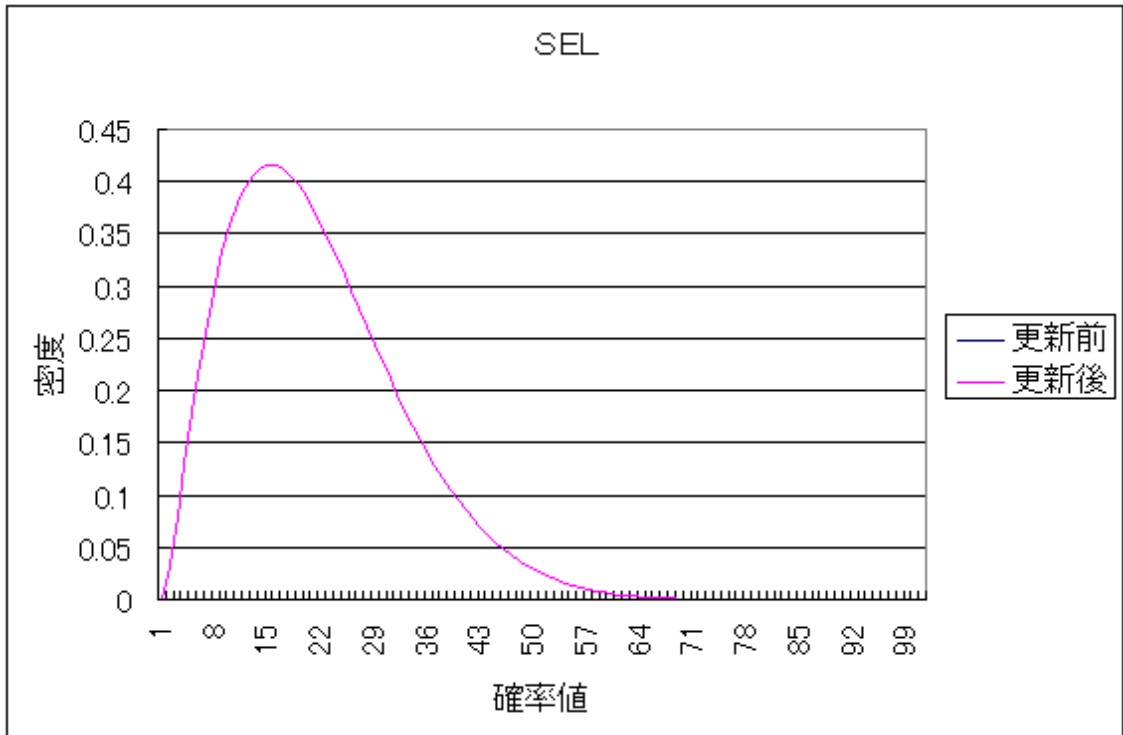


Figure4-12 Shift of probability density function of SEL failure rates

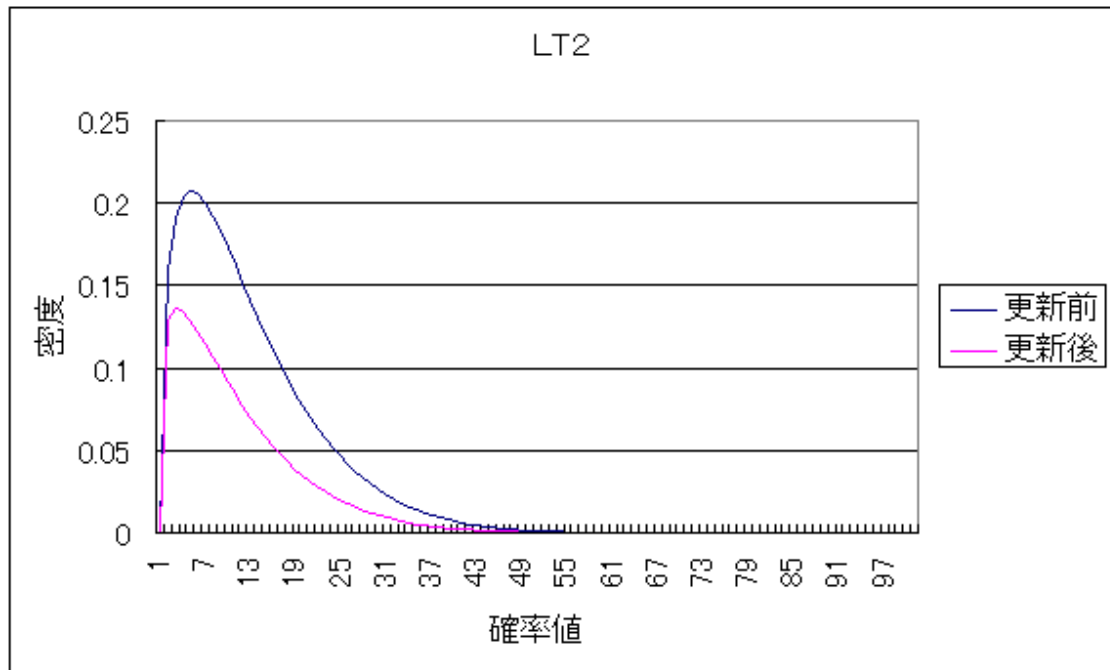


Figure4-13 Shift of probability density function of LT2 failure rates

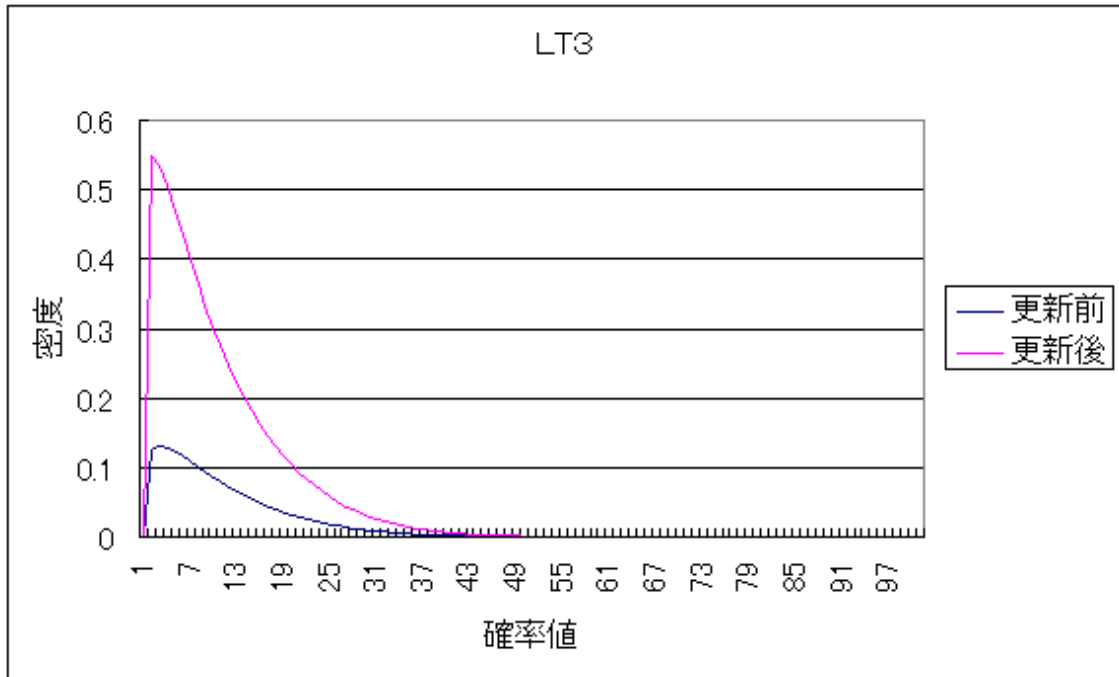


Figure4-14 Shift of probability density function of LT3 failure rates

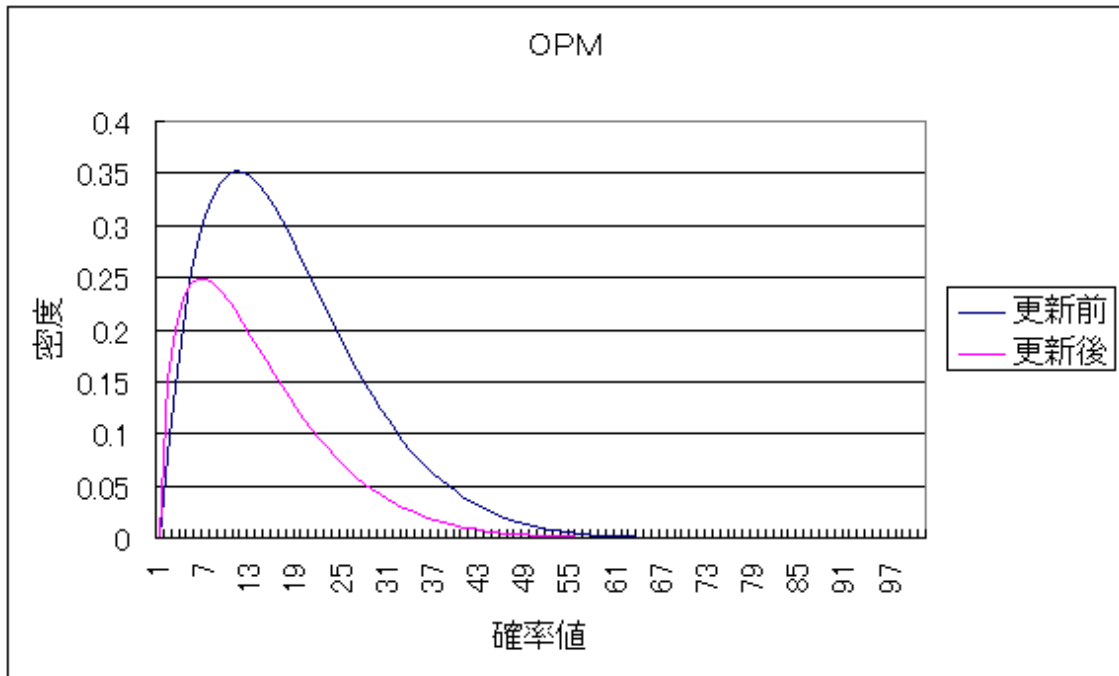


Figure4-15 Shift of probability density function of OPM failure rates

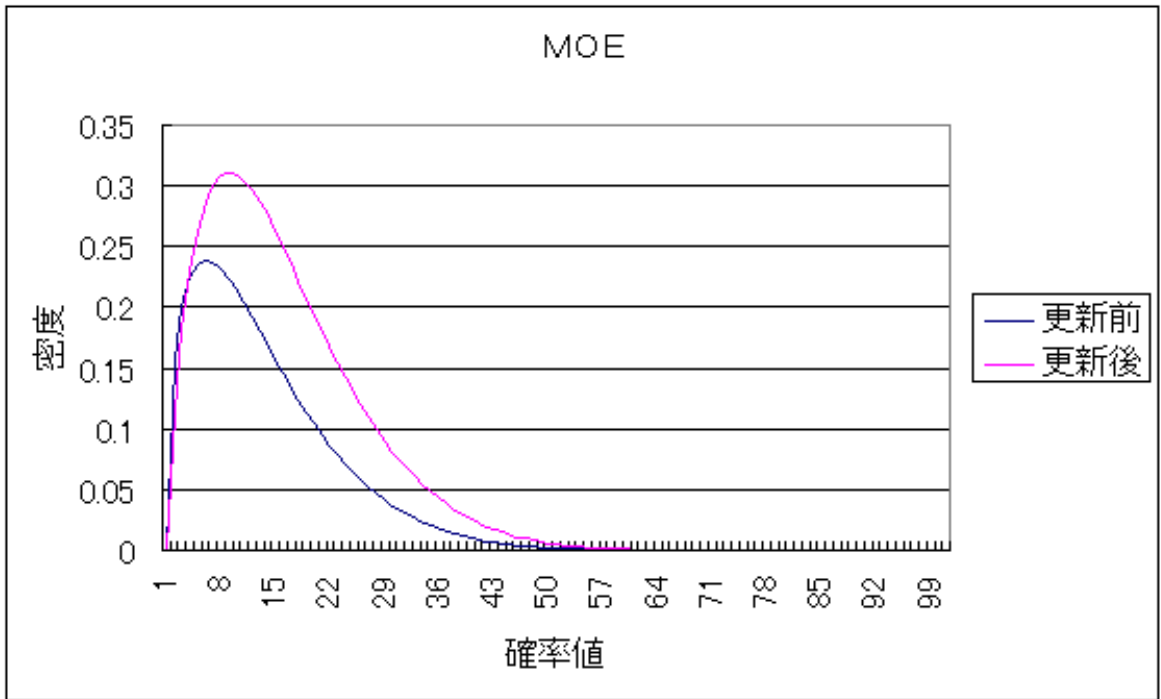


Figure4-16 Shift of probability density function of MOE failure rates

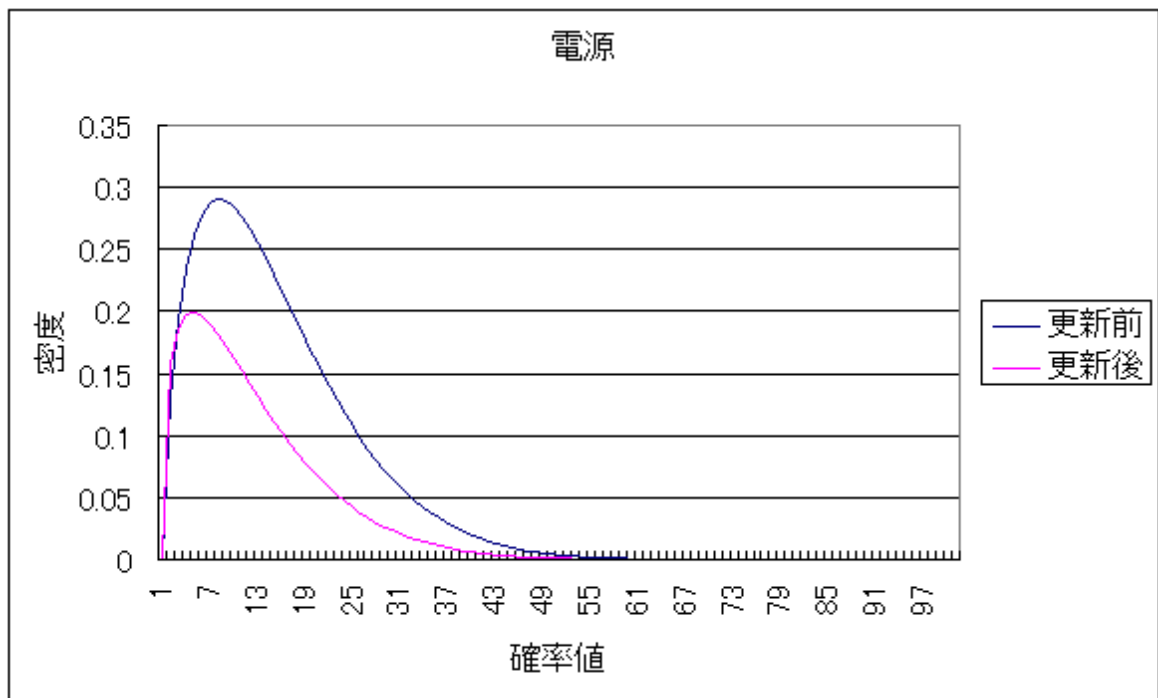


Figure4-17 Shift of probability density function of power failure rates

(2) 表示確率のベイズ更新

次に部品故障と表示をつなぐ部分確率の更新を行う。更新用のデータは1ヶ月の部品の故障回数とそのうち各故障表示につながった回数、つながらなかった回数である。 H_i に対して故障回数を n 、そのうち D_i の表示につながった回数を a 、つながらなかった回数を b とすると2項分布 (4-9) が更新用に使われる。

$$\Pr[n, a, b; p] = {}_n C_x p^a (1-p)^b \quad (4-9)$$

例えば1ヶ月にCP8が2回故障したとしてそのうち1回は「符号処理器故障」のみが、1回は「符号処理器故障」と「中継器故障」双方の表示が上がったとする。すると $H=CP8$ と各故障表示をつなぐ表示確率は以下のように求められる。

$$Bi[\text{符号処理器} | CP8] = {}_2 C_2 p^2$$

$$Bi[\text{EC間伝送装置} | CP8] = {}_2 C_0 p^0 (1-p)^2$$

$$Bi[\text{沿線情報伝送装置} | CP8] = {}_2 C_0 p^0 (1-p)^2$$

$$Bi[\text{中継器故障} | CP8] = {}_2 C_1 p^1 (1-p)^1$$

$$Bi[\text{中継器全器故障} | CP8] = {}_2 C_0 p^0 (1-p)^2 \quad (4-10)$$

この式は観測値 D_i (a, b) が既知であり p が未知であるから p の尤度関数とみなすことができる。事後分布はベイズの基礎式から以下の式のように更新される。

$$Be[\bar{p} | D_i] \propto Bi[n, a, b; p] \times Be[p | D_i] \quad (4-11)$$

(p を更新前のパラメータ、 \bar{p} を更新後のパラメータ、 D_i を表示とする)

またここでも故障確率のベイズ更新と同様に二項分布と β 分布が共役であることを利用して以下のように表すこともできる。

$$Be[\alpha, \beta; X_i] \rightarrow Be[\alpha + a, \beta + b; X_i] \quad (4-12)$$

(α 、 β は初期の β 分布のパラメータ、 a, b は更新時の二項分布のパラメータ)
 ここでもベイズ更新の連続性の性質からデータが集積するたびにこの作業を行い更新を続けていくことができる。今回も Table4-7 のデータを用いて更新を行った。以下に更新された後の分布と IOM3 が故障した際の表示確率 (4-13) の更新の様子をグラフを記す。

$$\Pr[H_i | a] \quad (1 \leq i \leq 5) \quad (4-13)$$

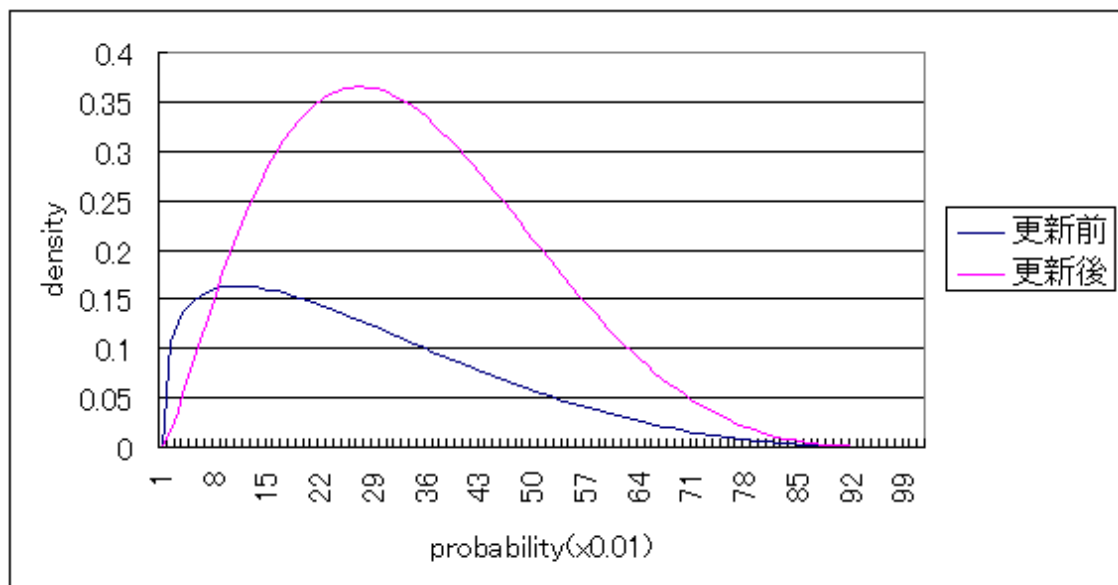


Figure4-18 Shift of sign probability function P(符号処理器 | IOM3)

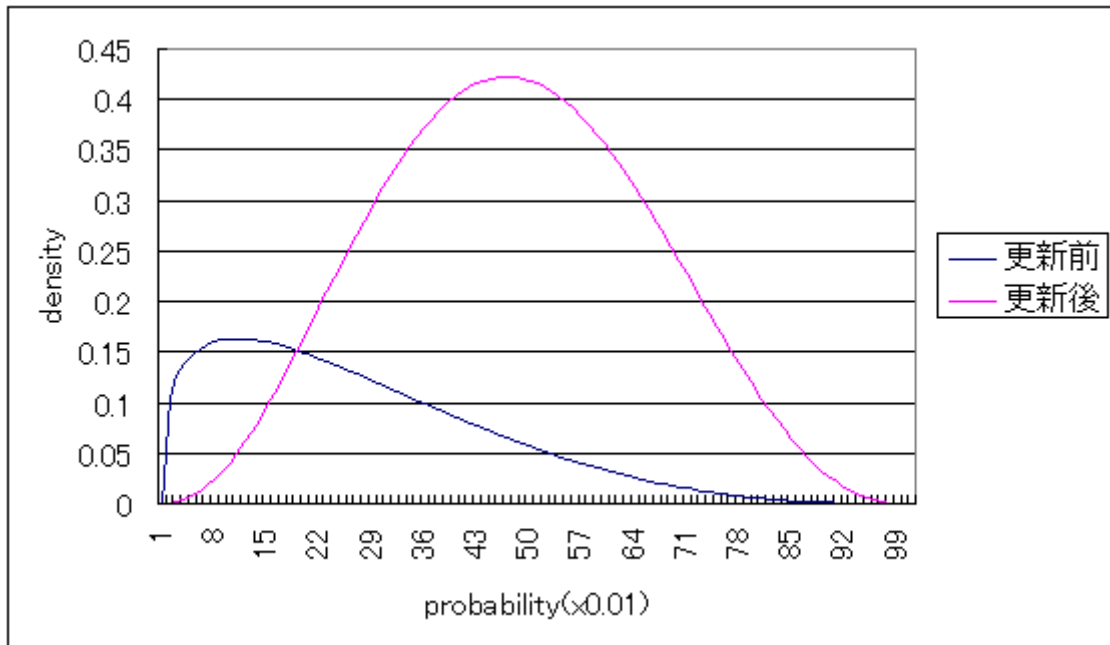


Figure4-19 Shift of sign probability function P(EC 間伝送 | IOM3)

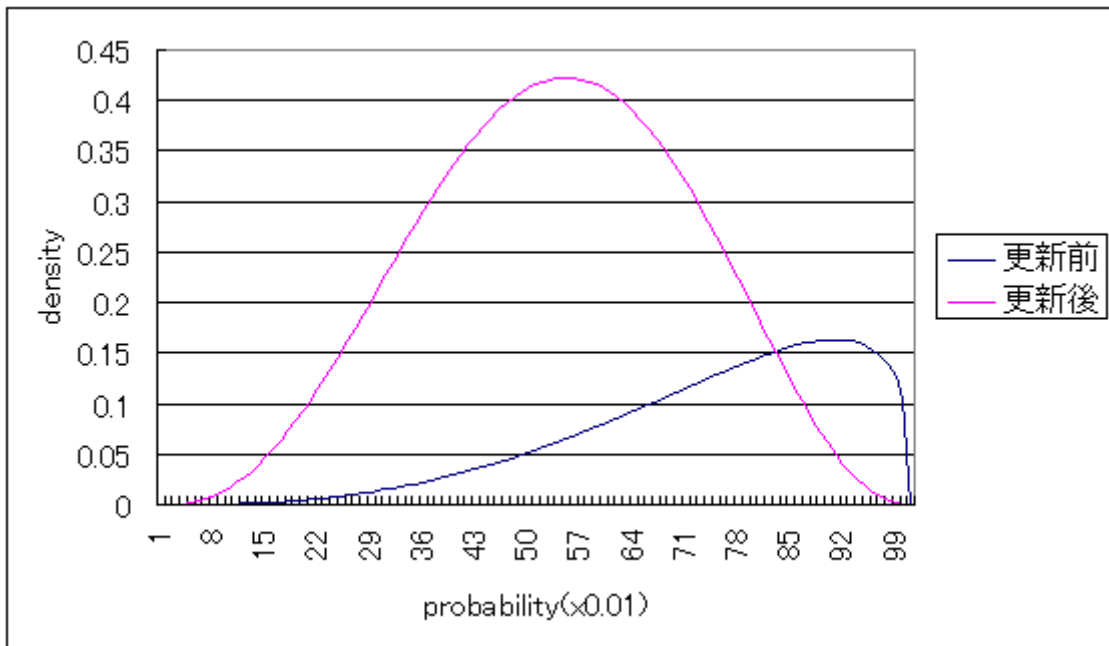


Figure4-20 Shift of sign probability function P(沿線情報 | IOM3)

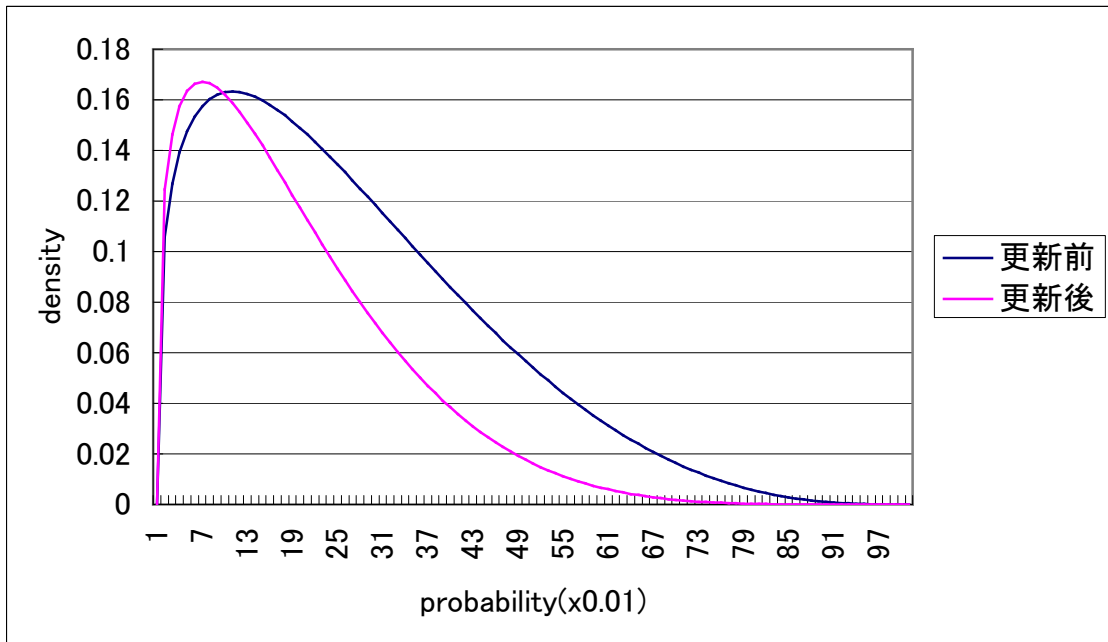


Figure4-21 Shift of sign probability function P(中継器 | IOM3)

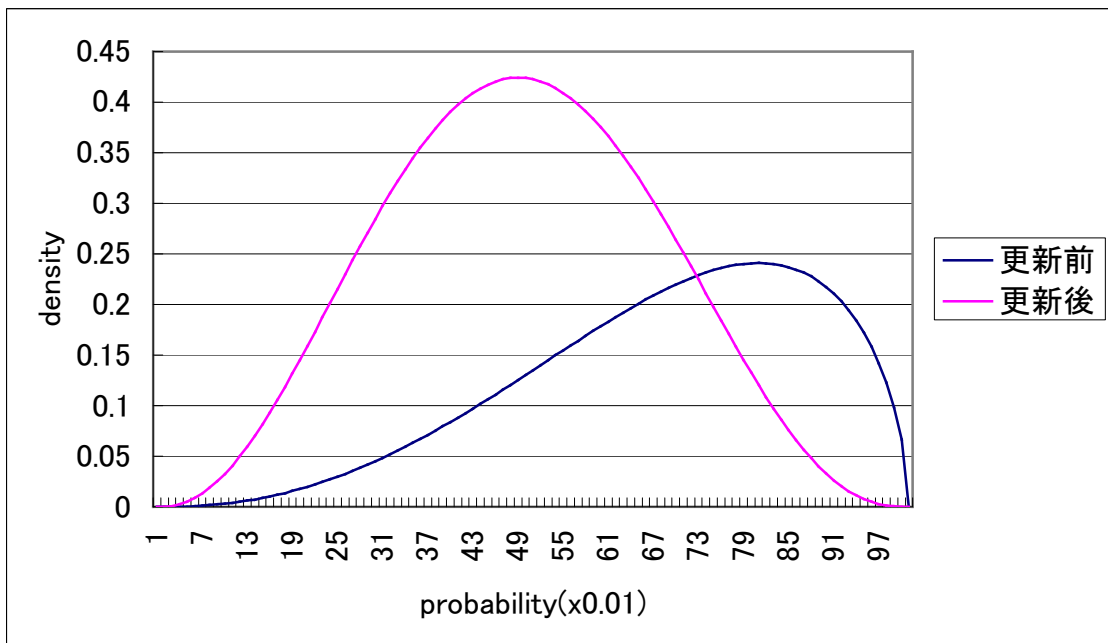


Figure4-22 Shift of sign probability function P(中継器全器 | IOM3)

4.7.3 モンテカルロシミュレーションによるベイズ更新の有効性検証

(1) 緒言

前節で事故が発生することに初期分布の確率密度関数が更新されていく様子を説明した。更新されて各確率密度関数が真の関数に近づいていくわけであるが与える事前分布により収束までかかる時間が異なる。収束までにかかる時間は短いほうが良いため事前分布を与えたときの収束までにかかる時間を検証する。

検証はモンテカルロシミュレーションを用いて以下のような手順で行った。

- (1) 部品の故障確率、表示確率に対して Table4-4, Table4-5 と同じ分布を設定する。これを真の分布とする。
- (2) (1) で定めた真の分布とはこれ以上ずれないだろうという範囲の確率分布を事前分布として用意する。
- (3) (1) の分布に従ってモンテカルロシミュレーションを行い (2) の初期分布をベイズ更新していく。
- (4) ベイズ更新された分布の期待値が真の分布の期待値に近づくにはどれほどの期間が必要なのか、主観確率を事前分布として与えることはどれほど有効なのかについて検証を行う。

(2) モンテカルロシミュレーションのモデル作成

モデルの構造は Figure4-1 と同一のものを用いる。このモデルは現実の定常監視システムを模したものであるから故障確率や表示確率は現実のシステムに即した真値があるはずである。今回のシミュレーションでは、前節で与えた各初期分布の期待値を用いる。具体的には Table4-7 に基づいた故障確率で事故を発生させ、Table 4-8 の表示確率に基づいて表示を発生させてシミュレートを行う。

部品名	シミュレートで用いる真値(%)
CP8	18.8
IOM3	10.4
CP4	13.9
IOM2	10.4
SEL	10.4
LT2	4.3
LT3	2
OPM	10.1
MOE	5.1
電源	7.3
中継器機器	7.3

Table 4-7 True relative failure rates used for simulation

部品名	符号処理器	中継器	中継器全器	EC 間伝送装置	沿線情報伝送装置
CP8	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1
IOM3	0.9	0.9	0.1	0.1	0.8
CP4	0.1	0.1	0.1	0.9	0.1
IOM2	0.1	0.1	0.8	0.9	0.1
SEL	0.9	0.1	0.8	0.1	0.1
LT2	0.9	0.1	0.8	0.1	0.1
LT3	0.9	0.1	0.1	0.9	0.1
OPM	0.9	0.1	0.1	0.1	0.9
MOE	0.9	0.1	0.1	0.1	0.9
電源	0.9	0.1	0.1	0.9	0.9
中継器機器	0.1	0.9	0.1	0.1	0.1

Table4-8 True sign rates used for simulation

(2) 事前分布の設定

Table4-7やTable4-8の母数を知らないものとして真値を予測する事前分布を設定する。真値とはずれた事前分布が真値に近づいていく様子を観察することが本章の目的であるから、真値を予測する際にこれ以上はずれないと考えられる分布を設定する。故障確率の初期分布であるが、これは信頼性のある各部品の故障率に基づいて設定するものであるから、各値が20%ずれて

いるとして設定する。今回は CP8、IOM3 を故障率 20%増の値、CP4、IOM2 が 20%減の値、他のものは真値を用いて故障確率の事前分布のパラメータを設定した。これらの値を Table4-9 に示す。

部品名	事前分布として与える故障確率のパラメータ
CP8	2.173
IOM3	1.202
CP4	1.071
IOM2	1.071
SEL	1.002
LT2	0.414
LT3	0.192
OPM	0.973
MOE	0.491
電源	0.703
中継器機器	0.703

Table4-9 Dirichlet distribution parameters of failure probabilities used as primary distributions

表示確率については Table3-1 を用いて事前分布を設定するわけだが、今回以下の表に置き換えて Table4-8 とずらして初期分布を設定した。

マトリクスの表示	発生確率
○	70%
△	50%
無印	30%

Table4-10 Matrix signs and corresponding sign Probability used for primary distributions

部品名	符号処理器	中継器	中継器全器	EC 間伝送装置	沿線情報伝送装置
CP8	Be(2.1,0.9)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)
IOM3	Be(2.1,0.9)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(1.5,1.5)
CP4	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(2.1,0.9)	Be(0.9,2.1)
IOM2	Be(0.9,2.2)	Be(0.9,2.1)	Be(1.5,1.5)	Be(2.1,0.9)	Be(0.9,2.1)
SEL	Be(2.1,0.9)	Be(0.9,2.1)	Be(1.5,1.5)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)
LT2	Be(2.1,0.9)	Be(0.9,2.1)	Be(1.5,1.5)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)
LT3	Be(2.1,0.9)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(2.1,0.9)	Be(0.9,2.1)
OPM	Be(2.1,0.9)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(2.1,0.9)
MOE	Be(2.1,0.9)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(2.1,0.9)
電源	Be(2.1,0.9)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(2.1,0.9)	Be(2.1,0.9)
中継器機器	Be(0.9,2.2)	Be(2.1,0.9)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)	Be(0.9,2.1)

Table4-11 Density functions of sign parameters
used as primary distributions

(3) モンテカルロシミュレーションの実行

本節では Table4-7,Table4-8 に従いシミュレーションを行い、Table4-9,Table4-10 として設定した事前分布を更新させていく。以下のような手順で行う。

(1) 仮想的に故障を発生させる

乱数を発生させ、Table4-7 の確率に基づいて作成した範囲に従い分類し範囲に対応した部品を故障させる。

(2) 再度乱数を 5 種類発せさせて Table4-8 のデータに従った範囲に分類して表示を上げる。

(3) 故障データでベイズ更新

(1)、(2) で起こされた故障の部品名、その時上がった表示の種類をもとに 4 章の方法で事前分布を更新させていく。

(4) 更新結果検証

以下にモンテカルロシミュレーションを行った結果を示した。以下のグラフには更新後の分布関数の代表値 (期待値)、95 パーセント信頼区間の下限値、上限値、真値の様子を表した。

95%信頼区間とは母数の真の値が区間 (L,U) に入る確率が 95%となるよ

うに設定する区間のことである。ここで L を下側信頼限界、U を上側信頼限界と呼ぶ。

(1) 故障確率の更新状況

シミュレートで使った故障率の20%高い値を使って事前分布を設定した CP8、IOM3 の故障確率の更新の様子を Figure4-23, Figure4-24 に示した。いずれも95%信頼区間が真値の周りに収束している様子が確認できる。代表値、信頼区間が安定してくるまでに約200件の実行回数を要している。

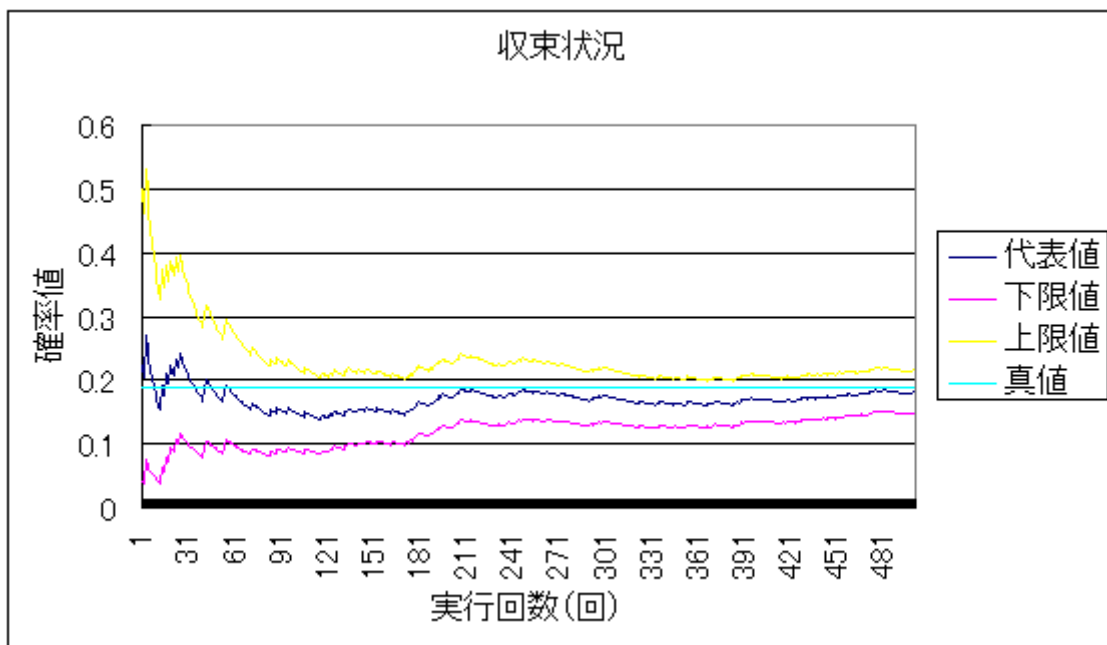


Figure 4-23 Shift of 95% Credible Interval of CP8 failure probability function

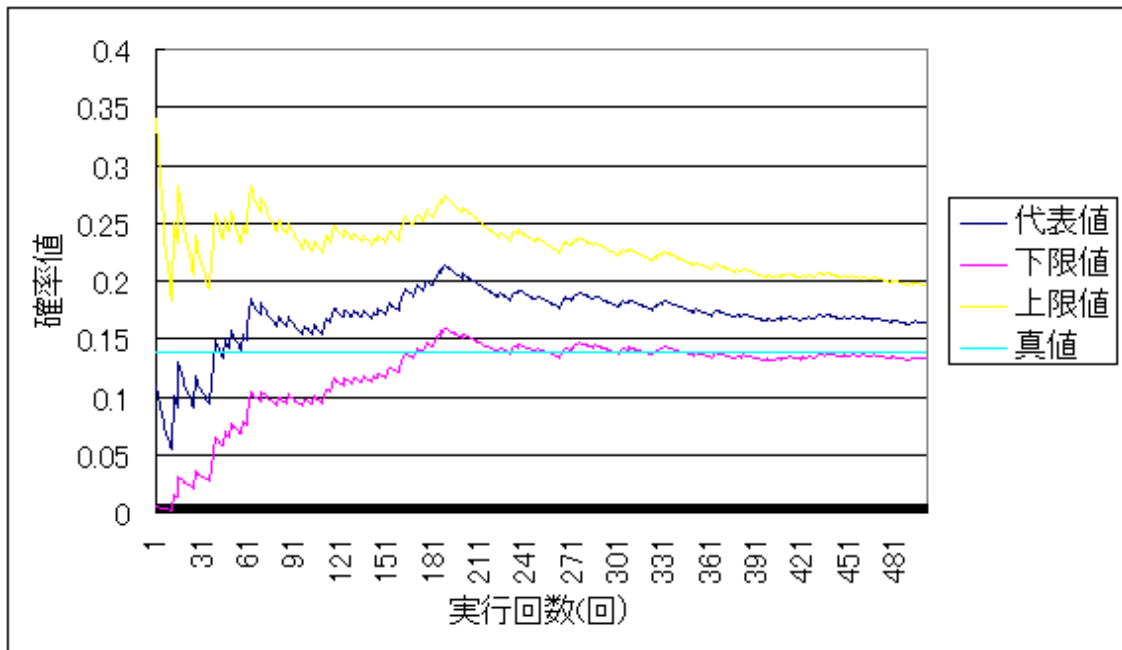


Figure 4-24 Shift of 95% Credible Interval of IOM3 failure probability function

次にシミュレートで使った故障確率より20%低い値を用いて事前分布を設定したCP4、IOM2の更新の様子をFigure4-25, Figure4-26に示す。ここでもCP8、IOM3と同様に95%信頼区間が真値の周りに収束する様子が確認できる。また代表値、95%信頼区間の安定まで200件の実行回数を要している。

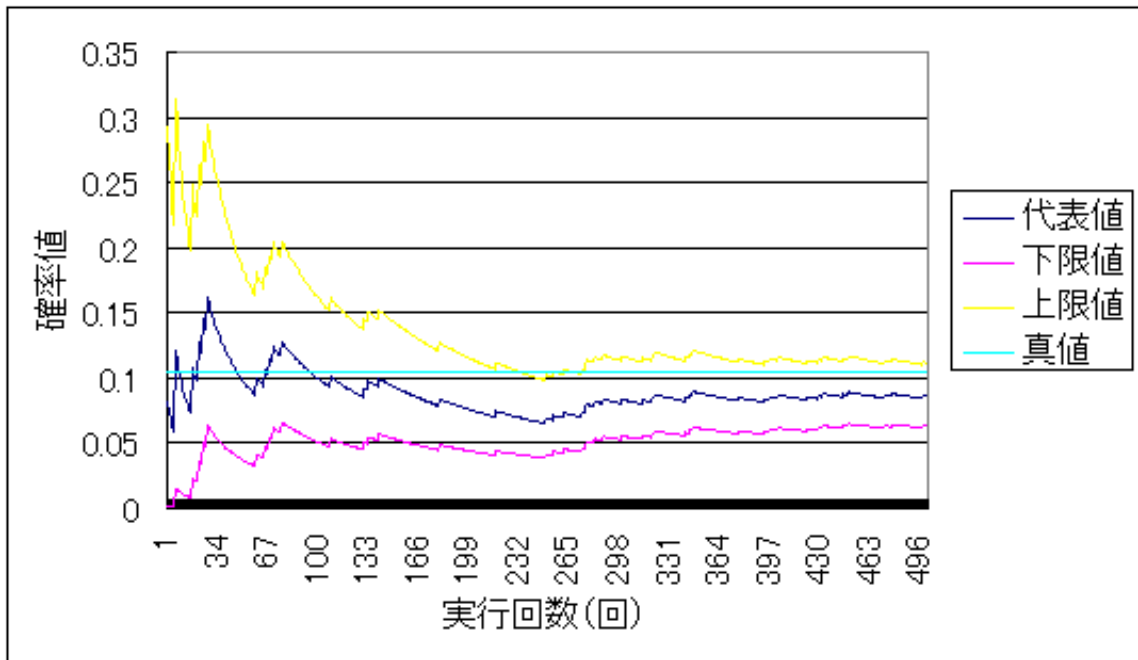


Figure 4-25 Shift of 95% Credible Interval of CP4 failure probability function

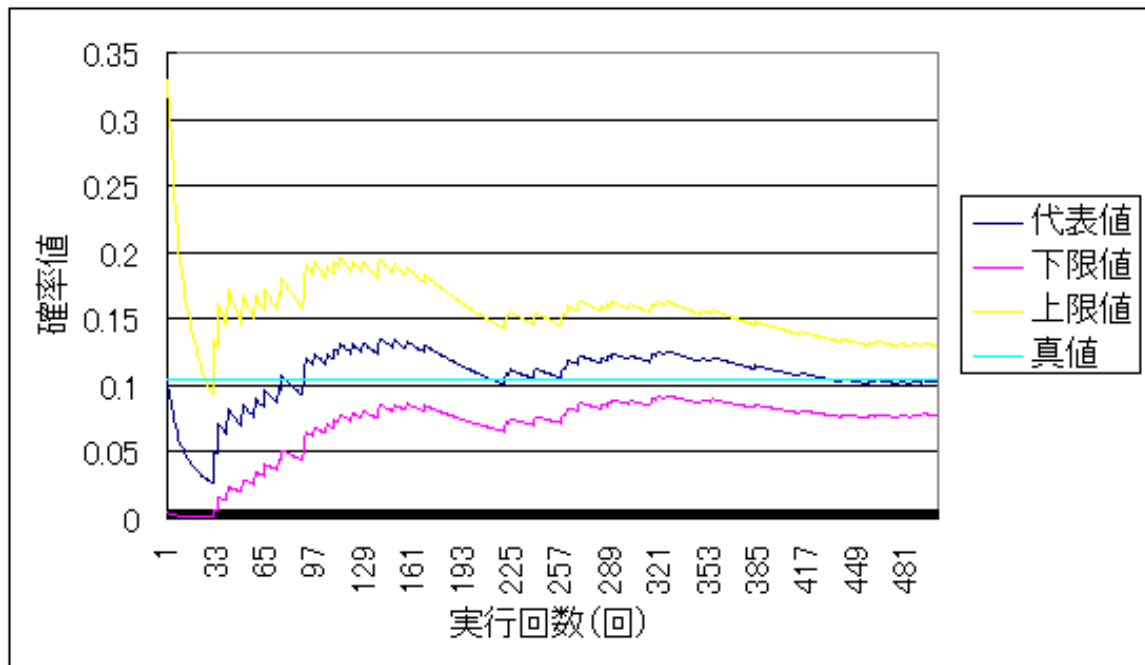


Figure 4-26 Shift of 95% Credible Interval of IOM2 failure probability function

(2)表示確率の収束状況

ここでは CP8 が故障したときの 3 種類の故障表示の表示確率、 $\Pr[\text{符号処理器故障} \mid \text{CP8}]$ 、 $\Pr[\text{EC 間伝送装置故障} \mid \text{CP8}]$ 、 $\Pr[\text{沿線情報伝送装置故障} \mid \text{CP8}]$ の更新の様子を Figure4-27,4-28,4-29 に示した。

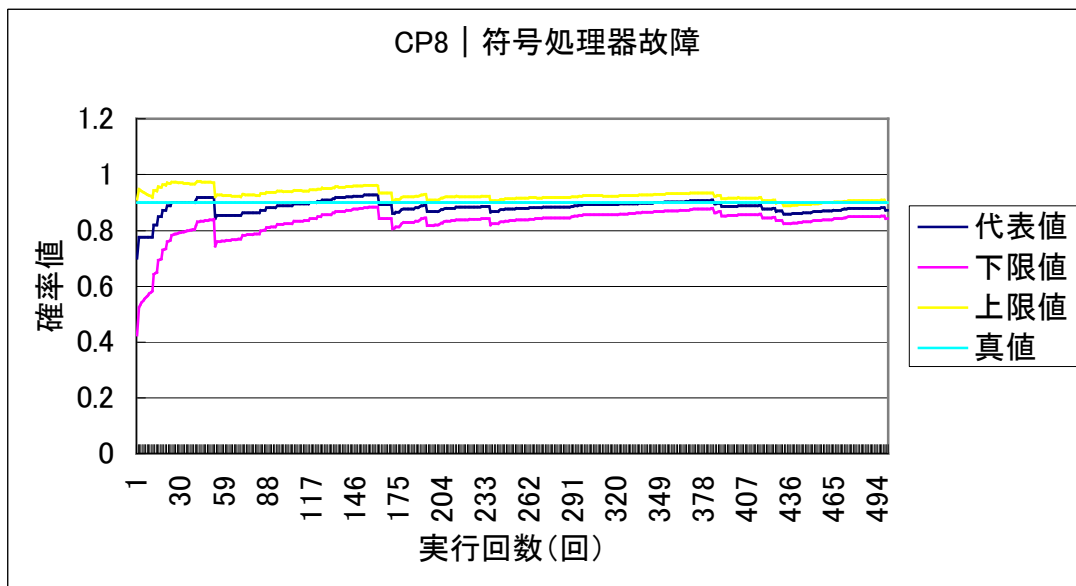


Figure 4-27 Shift of 95% Credible Interval of 「符号処理器故障」 resulted From CP8 failure

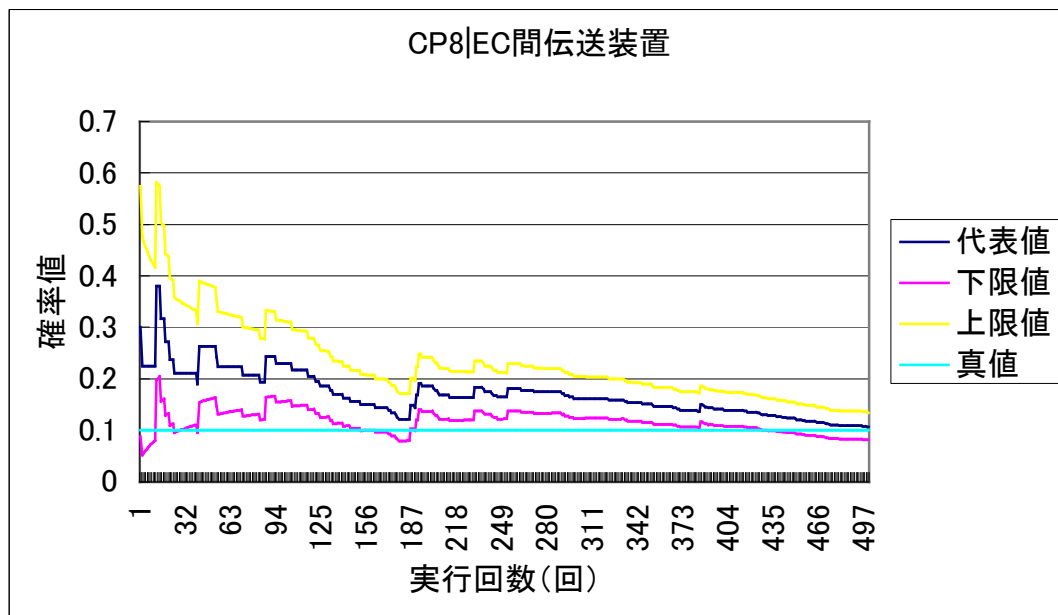


Figure 4-28 Shift of 95% Credible Interval of 「EC 間伝送装置故障」 resulted from CP8 failure

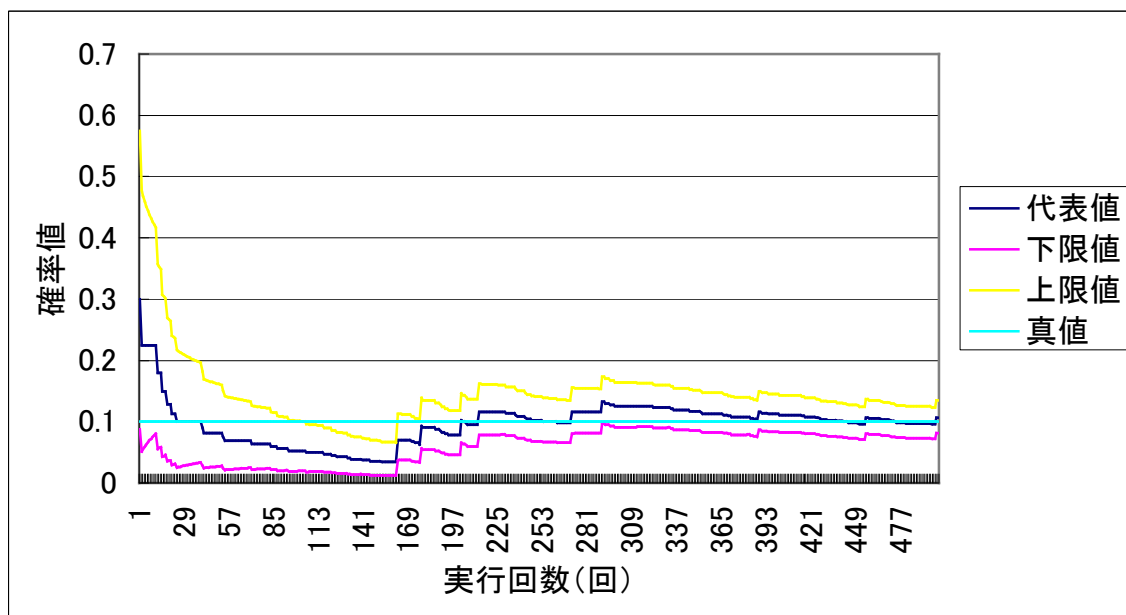


Figure 4-29 Shift of 95% Credible Interval of 「沿線情報伝送装置故障」 resulted from CP8 failure

表示確率においても上記のグラフに見られるように確率値は真値に近づき信頼区間は狭くなっている様子が確認できる。しかし表示確率が更新される回数に対応する装置の故障が発生した場合のみであるため故障確率の更新に比べて時間がかかる。特に Figure4-28 では500回近い実行により分布の代表値が真値に近づいた。

(5) 考察

故障確率に関しては200件のデータが集まれば大きくずれた事前分布を与えてしまっても収束される。一ヶ月に発生するアクシデントは約5件であるから3年強のデータが集積されれば正確な推定が行われると見てよい。

一方表示確率に関しては前節で述べたように故障確率の更新に比べ効率が悪いので、より多くのデータが必要である。表示確率の事前分布を与える際は指令員にヒアリング調査を行う等により慎重に行わなければならない。

4.8 結言

本章では3章で作成したモデルにベイズ推定の手法を取り入れた改良モデルを作成した。これにより上がった故障を把握した上で各部品の故障が起きてい

る相対的な割合を数値的に出力することが可能となった。故障表示が上がった際にこのモデルに故障表示情報を入力すると簡単に復旧作業の優先順位等が把握でき適確な指令を出すことができる。また本モデルに与えた事前分布を今後集積されていくデータにより更新していく方法についても検証を行い有効性を示した。

4.9 付録

今回提示した方法を応用することにより上がってきた故障表示がアクシデント情報かインシデント情報かを区別することも可能である。本節ではその方法を紹介する。Figure4-30 にモデルを示した。

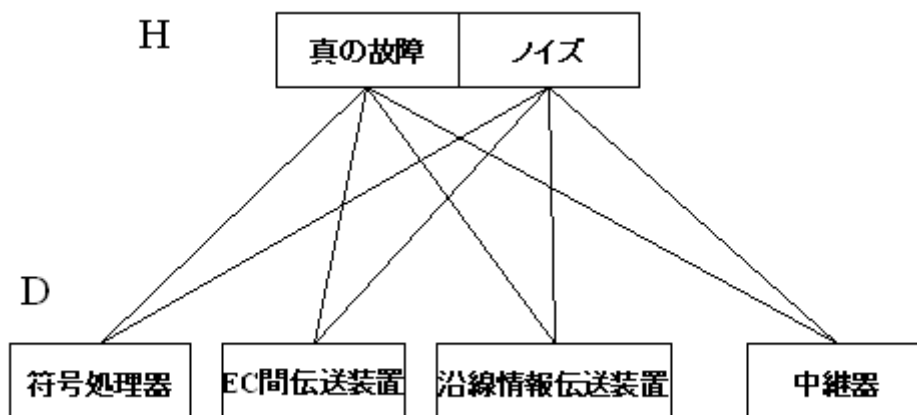


Figure4-30 Bayesian Inspection model of real failure and noise

(1) モデルの作成

原因を表す変数 H は「真の故障」と「ノイズ」の二種類のノードをとりうる。表示を表す変数 D_i は Figure4-2 と同様に 0 と 1 をとりうる。

(2) 確率事前分布の設定

Figure4-30 作成時と同じ理由で H の確率、 H 発生時の D の部分確率に β 分布を与える。過去のスクリーニングで残った表示情報のうちで真の故障が原因で上がったものとノイズが原因で上がったものの割合によって各分布のパラメータが設定できる。参考として 2006 年 6 月～9 月の真の故障が原因の表示回数とノイズが原因の表示回数を Table4-12 に載せた。

故障表示	真の故障	ノイズ
符号処理器故障	14	50
EC 間伝送装置故障	2	81
沿線情報伝送装置故障	0	55
中継器故障	9	1229

Table4-12 comparison of failure sign data resulting from true error and noise

- (3) 今後蓄積されていくデータを用いてベイズ推定法に基づき初期分布を更新していく

本方法により 2 章のスクリーニングを経た情報に対してさらにノイズの疑いをかけることにより取り扱う情報の精度が高まる。

第5章 本研究のまとめ

5.1 緒言

1.2 では定常監視システムモニタに上げる表示の数を減らし、故障表示から故障している原因を突き止めることを目的としてあげた。2章の故障情報のフィルタリングでは前者の目的を、3、4章ではベイズ特定モデルにより後者の目的を達成させることができた。本研究は東日本旅客鉄道における実用化を視野に入れた研究であるため前章までの成果をどのようにして利用するかを本章でまとめる。

5.2 故障特定モデル概要

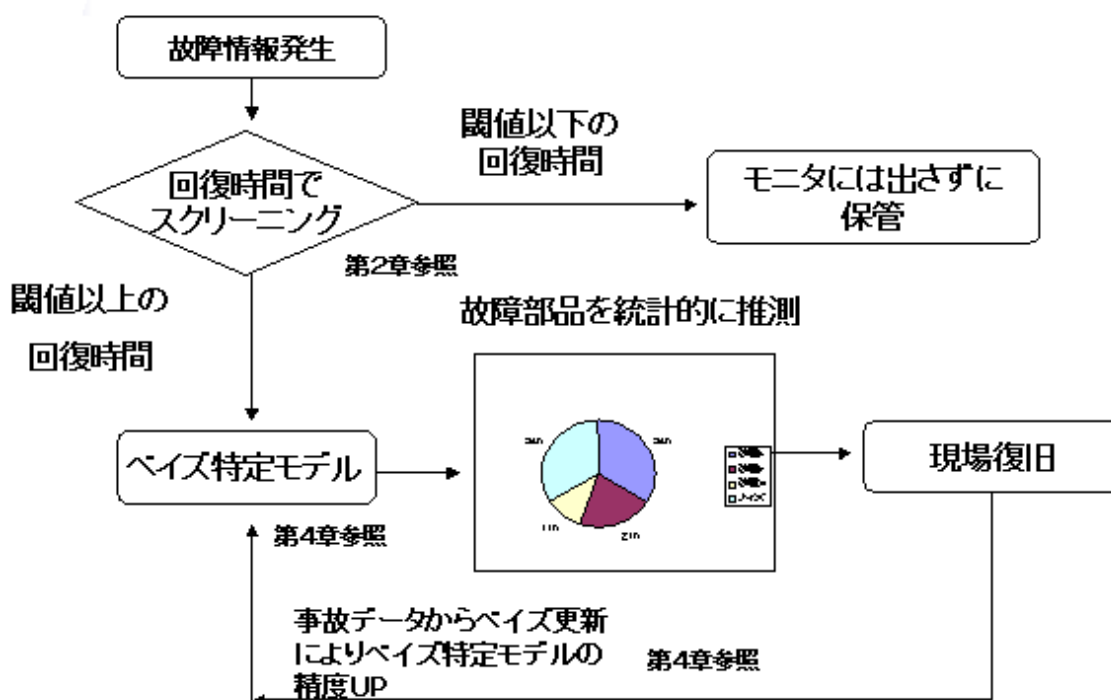


Figure 5-1 image of Bayesian inspection system

以下の手順により故障情報を分析する

- ① 故障情報が発生する。
- ② 回復時間をもとにスクリーニング。
モニタの表示が「発生」から「回復」に至る時間が設定した閾値より短いものはインシデント情報として別途保管、閾値より長いものはアクシデント情報として次の段階へ進める。（第2章参照）
- ③ ベイズ特定モデルに入力

スクリーニングで残ったアクシデント情報をベイズ特定モデルに入力する。各部品の相対的な故障している度合いを **Figure4-7** のように表示
(第4章参照)

- ④ 表示に従い指令員が現場に指示を出す
Figure4-7にしたがって、故障の疑いの強い部品名、用意すべき機材等を連絡し現場に保線員を派遣する。(第4章参照)
- ⑤ 特定モデルの精度向上
故障が起こる度に、故障した部品の名前、その時上がった表示名を用いてベイズ特定モデルの事前分布を更新する。(第4章参照)

5.3 データの集積方法

本システムでは故障データはベイズ特定モデルのベイズ更新に用いる。故障事故が発生した際は故障した部品名、そのとき上がった故障表示の種類を記録しておく。この情報さえあれば更新作業を行うことができる。

5.4 今後の課題と展望

今回作成したモデルには欠点がある。それは故障情報スクリーニングの際に回復時間のみを基準としているため、高頻発短時間回復の表示として現れるアクシデント情報をインシデント情報とみなしてしまう点である。このような場合は稀であるが、今後こう頻発短時間回復表示とインシデント情報の表示を区別する方法を考える必要がある。

次に本研究の今後の展望である。今回特定モデルを作成した際に用いたデータは主にアクシデントの情報である。これとは別に大量に用意されたインシデント情報を用いることでさらに本システムを高精度化することが考えられる。過去のインシデント情報から故障表示のパターンを認識し、その中から確実に故障ではないと確信できるパターンを抽出する。これを用いることで、回復時間という観点以外からもスクリーニング作業を行うことができる。これは上記の欠点を補う役割も果たすことにつながる。

参考文献

- [1] 鉄道技術研究所、日本鉄道電気技術協会 “わかりやすい鉄道技術 2”
(2005)
- [2] 東日本旅客鉄道、「定常監視システムログデータ、装置資料」
- [3] Mark G. Stewart, Robert Melchers 酒井信介監訳 「技術分野におけるリスクアセスメント」(2003) 森北出版株式会社
- [4] 市川昌弘、「信頼性工学」(1990) 裳華房
- [5] 繁柘算男 植野真臣 本村陽一、「ベイジアンネットワーク概説」(2006)
培風館
- [6] 渡辺洋 「ベイズ統計学入門」(1999) 福村出版
- [7] 東京大学教養学部統計学教室 「自然科学の統計学」(1992) 東京大学出版会

謝辞

本研究では酒井教授、泉助教授には研究会、打ち合わせでのアドバイスをはじめとして多大なご指導を頂きました。また東日本旅客鉄道株式会社の杉本さん、石渡さんには情報の提供、打ち合わせでの議論等、現場の立場からの貴重なご意見を頂きました。毎回の打ち合わせは私にとっては非常に刺激のある場でした。博士課程の岡島さんは様々な手法の紹介、論文のチェックをはじめとして様々なアドバイスをしてくださいました。本論文が後半でベイズ手法を使う方向へと向かったのも岡島さんへの相談がきっかけでした。

以上

1 ～ 64 ページ完

卒業論文

2月2日提出

50241 程島雄造