大規模交通管制システムの
最適更新戦略に関する研究

2008年7月

山本　浩司

目 次

1 序論 **1**

1.1 研究の背景 1

1.2 情報システムの技術的陳腐化 2

1.2.1 交通管制システムの更新戦略 2

1.2.2 ランダム比例ハザードモデル 3

1.2.3 劣化現象を考慮した動的故障解析 3

1.2.4 陳腐化を考慮した大規模情報システムの最適更新戦略 4

1.3 本論文の構成 4

2 交通管制システムの更新戦略 **5**

2.1 緒言 5

2.2 本章の基本的な考え方 5

2.2.1 従来の研究概要及び交通管制システムの更新戦略の必要性 5

2.3 交通管制システムの更新戦略 6

2.3.1 交通管制システムの更新戦略の全体構成 6

2.3.2 既存計画調査 7

2.3.3 現状調査 7

2.3.4 課題分析 7

2.3.5 関連技術動向調査 7

2.3.6 評価モデル作成 9

2.3.7 アセットマネジメント評価 10

2.4 適用事例 10

2.4.1 適用事例の概要 10

2.4.2 既存計画調査結果 12

2.4.3 現状調査結果 12

2.4.4 関連技術動向調査結果 · · · · · 18
2.4.5 評価モデル作成 · · · · · 19
2.5 結言 · · · · · 20

3 ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデル 21

3.1 緒言 · · · · · 21
3.2 本章の基本的な考え方 · · · · · 22
3.2.1 従来の研究概要 · · · · · 22
3.2.2 大規模システムの劣化過程 · · · · · 24
3.2.3 モデル化の基本的フレーム · · · · · 25
3.3 ランダム比例ハザードモデル · · · · · 26
3.3.1 ワイブル劣化ハザードモデル · · · · · 26
3.3.2 ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデル · · · · · 28
3.3.3 モデルの推計法 · · · · · 29
3.4 適用事例 · · · · · 33
3.4.1 適用事例の概要 · · · · · 33
3.4.2 推計結果 · · · · · 34
3.4.3 比例性仮説の検定 · · · · · 34
3.4.4 分析結果 · · · · · 37
3.5 結言 · · · · · 41

4 劣化現象を考慮した動的故障解析 45

4.1 緒言 · · · · · 45
4.2 本章の基本的な考え方 · · · · · 46
4.2.1 従来の研究概要 · · · · · 46
4.2.2 情報システムのアセットマネジメントの課題 · · · · · 47
4.2.3 情報システムの故障過程 · · · · · 47
4.2.4 情報システムのリスクマネジメント · · · · · 50
4.3 静的フォールト・ツリー分析 · · · · · 51
4.3.1 分析の目的 · · · · · 51
4.3.2 フォールト・ツリーの構築 · · · · · 52
4.3.3 影響度 · · · · · 53
4.3.4 頂上事象の発生確率と期待影響度算定 · · · · · 54

4.4 動的故障解析モデル 56
4.4.1 中央局システムの故障・更新過程 56
4.4.2 ランダムワイブル劣化ハザードモデル 58
4.4.3 機器レベルの故障・更新過程 60
4.4.4 リスクマネジメント指標 63
4.5 適用事例 63
4.5.1 適用事例の概要 63
4.5.2 シミュレーション条件 64
4.5.3 動的故障解析結果の考察 65
4.5.4 システム更新問題への拡張 68
4.6 結言 70

5 陳腐化を考慮した最適更新戦略 73

5.1 緒言 73
5.2 本章の基本的立場 74
5.2.1 従来の研究概要 74
5.2.2 情報システムの集約化・更新問題 75
5.3 最適システム更新モデル 76
5.3.1 前提条件 76
5.3.2 OP システムの最適導入戦略 78
5.3.3 OP システムのメニュー価値 79
5.3.4 システムの最適導入戦略 81
5.3.5 最適システム更新モデルの定式化 82
5.4 最適システム更新モデルの解法 83
5.4.1 モデルの基本構造 83
5.4.2 解法 84
5.4.3 リアルオプション価値 85
5.4.4 適用事例 87
5.4.5 適用事例の概要 87
5.4.6 交通情報サービスに対するドライバーの認知構造 89
5.4.7 支払い意思額の推計 94
5.4.8 分析結果 99

5.4.9 実用化への展望 102
5.5 結言 102

6 結論と課題 **106**

第１章

序論

1.1　研究の背景

交通管制システムは，高速道路上で発生した渋滞の悪化を防止するための情報提供や，渋滞を早期に解消させるための情報提供，並びに事故や故障車などの交通障害にも迅速に対応して速やかに正常な交通流に回復させるための交通管理の支援を目的に，車両検知器，気象観測設備などの情報収集装置からの情報や他の関連するシステムからの情報など，交通流に関するあらゆる情報の収集，及び処理を行っている．

交通管制システムに代表される情報システムのライフサイクルには，機能低下，或いは機能低下を防ぐための費用が限度を超えた場合に起こる物理的寿命と，物理的にはまだ使えるが，より高度な機能が求められた場合に起こる社会的寿命に大別される．社会的寿命は情報システムの技術的陳腐化ともいわれ，市場の要求にこたえられなくなった技術と位置付けることができる．情報システムの技術的陳腐化は，新規機能の追加や，量的拡大に対応不可（もしくは高コスト）といった，新しい要求に対応できなくなった時に初めて顕在化する．放置しておけば，改造費用の高止りやサービスレベルの低下に直面する．また，情報システムの技術的陳腐化は，開発事業者の戦略転換により発生する．ドッグイヤーで成長を続ける情報システムの世界において，ある技術が技術的に旧式化したり，市場におけるシェアが低下したりすると，それに伴い開発事業者は新製品の供給停止，バージョンアップの停止，サポートの停止，保守員の縮減といった戦略転換を行う．この開発事業者の戦略転換はそのまま情報システムに対し直接的に作用するため，新しい要求に対する対応の鈍化といった現象がユーザ企業内において顕在化する．（**図 1-1** 参照）これを回避する戦略は市場におけるシェアが高い技術への移行（更新）である．しかし，技術の移行（更新）を図るには，相応の投資が必要となることから，その投資効果を明確に説明するためにも，関連技術動向調査，評価モデル作成，並びにこれらを総合的に評価するアセットマネジメントを実施する手法等，最適更新戦略手法の開発が望まれていた．以上の問題意識の下に，本研究では，交通管制システムの更新戦略手法として，現行の業務処理の流れ，各業務の利用機能，処理の発生状況（件数等），問題点・改善課題・ニーズ等を踏まえ交通管制システムの最適化に向けた関連技術動向調査，評価モデル作成，アセットマネジメントを実施する手法を提案するとともに，情報システムが膨大な数の機器群で形成される大規模システムであ

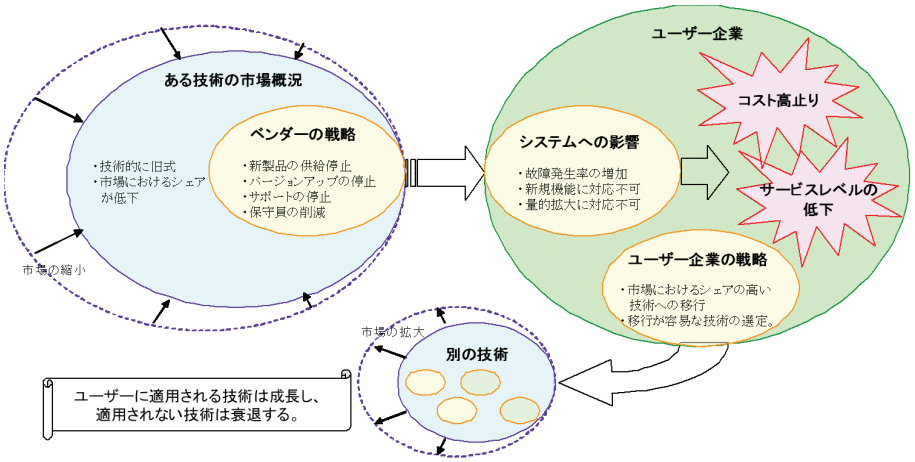


図 1-1 情報システムの技術的陳腐化の概念

ること，システムが階層構造を有しており，個々の機器の故障が施設全体の故障に発展する可能性があること，情報システムの物理的劣化だけでなく，陳腐化等に代表されるようにシステムの機能的劣化も重要な管理項目となること等を鑑み，情報システムのアセットマネジメントとして，機器レベル，システムレベル，機能レベルという，マネジメントレベルの差異に配慮した手法を提案する．

1.2 情報システムの技術的陳腐化

1.2.1 交通管制システムの更新戦略

これまで，交通管制システムは，現行の業務処理の流れ，各業務の利用機能，処理の発生状況（件数等），問題点，改善課題，ニーズ等を踏まえ，既設システムの機能を追加開発，或いは新たな機能を有するサブシステムを次々に構築するといった対処療法が採用されてきた．しかし，このような改修を繰り返し，継ぎ接ぎだらけとなった交通管制システムは，業務効率の低下を招くとともに，システムの保守・運用を困難なものとしていた．特に，2007年前後に、日本の情報化を牽引したベテラン・エンジニアが一気に引退することに起因する「2007年問題」も事態を深刻にしており，プログラムの保守・運用が立ち行かなくなるのではと危惧されている．交通管制システムに代表される情報システムは，モデルのライフサイクルが短く，このような問題を有していることから，システムの建設費，供用後の維持費と修繕費，更新費の他，情報システムの技術的陳腐化，及びこれらの数多くある個々のシステム・機器の最適化（再構築）も考慮した更新戦略の検討が望まれていた．以上の問題意識の下に，本研究では，交通管制システムの建設費，供用後の維持費と修繕費，更新費の他，情報システムの技術的陳腐化，及びこれらの数多くある個々のシステム・機器の最適化（再構築）も考慮した更新戦略手法，及びその検討工程を，情報システムの最適更新戦略に向けた各種調査，評価モデル・システムの最適化（再構築）計画案作成工程と，検討されたシステム

の最適化（再構築）計画案を定量的かつ客観的に評価する工程に大別したものを提案する．なお，後工程では，将来時点の維持費と修繕費，更新費の他，情報システムの技術的陳腐化を予測し，最適な対策工法と対策時期を選定することにより，情報システムの計画的かつ効率的な更新戦略を策定するアセットマネジメント評価プロセスとした．さらに，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を通じて，提案したシステム・機器の最適化（再構築）も考慮した更新戦略の実効性を確認する．

1.2.2 ランダム比例ハザードモデル

交通管制システムに代表される大規模システムは，極めて多くの種類の機器で構成される複雑な構造を有している．大規模システムを運営・管理する上で，これらの数多くある個々の機器ごとの取替え戦略や備蓄方策を検討することが重要な課題となる．しかし，これらの機器の故障率が，すべて同一のハザード率で表現できるとは限らない．むしろ，機器の種類ごとのハザード率は，多様に異なると考えた方が自然であろう．このように機器の種類によるハザード率の異質性を表現する方法として，1）機器特性の相違をダミー変数で表現する方法，2）ハザード率の確率分布を考慮する方法が考えられる．前者の方法は，簡便で分かりやすいという利点がある．その一方で，機器の種類が増加するにつれて，機器特性を表すダミー変数の数が増加し，モデルの推計結果の効率性が著しく低下するという問題がある．実際に，大規模情報システムは，同一種の機器であってもさらに用途や設置場所などの相違によって細分類することが可能であり，極めて少数・多品種のカテゴリーに属する機器で構成されている．このような多品種のカテゴリーに応じたダミー変数を用いてハザードモデルを推計することは実際的ではない．そこで，本章では後者の方法を採用し，機器の種類によるハザード率の異質性を確率分布で表現するようなランダム比例ハザードモデルを用いて，情報システムを構成する機器群の故障過程をモデル化する．

1.2.3 劣化現象を考慮した動的故障解析

本研究では，機器の故障過程をハザードモデルで表現するとともに，これらの故障過程がシステム全体の機能レベルの故障に及ぼす影響を，動的フォールトツリー分析モデルを用いて分析する．このうち，機器の統計的故障解析に関しては，ハザードモデルを用いた研究事例が蓄積されている．また，アセットマネジメントの分野においても，多段階指数ハザードモデルをはじめとして，いくつかの新しい劣化ハザードモデルが提案されている．情報システムの故障過程を分析する場合，機器の故障事象は，故障の有無という２値情報で表現されるため，伝統的なハザードモデルの適用が可能である．本研究では，交通管制システムが，膨大な種類の機器類で構成されていることに着目し，多品種・少数の機器群の故障過程をモデル化するために，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを提案している．さらに，機器の故障により情報システム全体の故障が発生するメカニズムをフォールトツリーにより表現した．その上で，時間の経過に伴って変化する機器群の故障率の変化や，機器の復旧時間の変化が，情報システムの故障発生確率や，

故障がもたらす影響度の時間的変化に及ぼす影響をモンテカルロ・シミュレーションにより分析する方法論を提案する．さらに，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を通じて，提案したハザードモデルの有効性を実証的に検証する．

1.2.4 陳腐化を考慮した大規模情報システムの最適更新戦略

情報システムの陳腐化は，それを利用するユーザーのニーズや需要の変動によっても生じる．本研究の実証分析でとりあげる交通情報システムの場合，新しい路線が開通することにより，既存の交通情報システムに対する負荷が急増し，情報システムの処理能力では対応しきれない場合が発生する．この場合，情報システムの更新が必要となる．あるいは，ドライバーのニーズが高度化し，既往のシステムでは対応できないような新しい交通情報サービスの提供が求められることもある．このような場合，情報システムの従前の技術を継続的に利用し続ける場合，情報システムが更新本来獲得できるであろう便益を逸失する (機会費用が発生する) ことになる．本研究では，技術的陳腐化を考慮した大規模情報システムの最適更新問題をとりあげる．その際，大規模情報システムが，基盤システムと複数のサブシステムで構成されると考える．その際，技術的陳腐化が，1) 情報システムの導入費用の低減，2) 新しいサブシステムの出現により，情報システムの技術的陳腐化が発生すると考える．基盤システムの不可分性とサブシステム技術の実用化タイミングの不確実性に起因して，大規模情報システムの更新時機決定問題に，情報オプションと拡張オプションが存在することを明らかにする．このようなオプション価値を明示的に考慮し，期待純便益を最大にするような更新時点とサブシステムのメニューを決定するような最適更新モデルを定式化する．さらに，高速道路の大規模情報システムテムを対象とした実証分析を通じて，本研究で提案した方法論の有効性を実証的に検証する．

1.3 本論文の構成

本論文の構成は，以下に示すとおりである．

2章では，交通管制システムに代表される情報システムの世界における情報システムの最適化について，近年のトピックスを把握することにより，交通管制システムの更新戦略手法を提案するとともに，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を示す．

3章では，交通管制システムは極めて多くの種類の機器で構成される複雑な構造を有しているから，消耗故障系機器の故障発生過程を表現するためのランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを提案し，実際の故障履歴データを用いて故障発生確率を推計するとともに，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を示す．

4章では，交通管制システムの建設費，供用後の維持費と修繕費，更新費や，安全に関する被害，環境への被害を被害，経済性に関する被害と，情報システムの動的故障過程を同時に考慮に入れて，大規模情

報システムの動的故障分析モデルを定式化するとともに，モンテカルロ・シミュレーションによりシステムの期待補修費用，期待影響度の動的変化を分析する方法論を提案する．

5章では，大規模情報システムの社会経済的，技術的な陳腐化を考慮した最適システム更新モデルを定式化する．さらに，交通管制情報システムの更新問題を対象として，システムの集約化と新しいサブシステムの導入戦略を検討するための方法論を提案する．

最後に，**6章**において，本論文のまとめと今後の課題について整理する．

第2章

交通管制システムの更新戦略

2.1　緒言

交通管制システムは，高速道路上で発生した渋滞の悪化を防止するための情報提供や，渋滞を早期に解消させるための情報提供，並びに事故や故障車などの交通障害にも迅速に対応して速やかに正常な交通流に回復させるための交通管理の支援を目的に，車両検知器，気象観測設備などの情報収集装置からの情報や他の関連するシステムからの情報など，交通流に関するあらゆる情報の収集，及び処理を行っている．交通管制システムは，各種のモニタリング装置，コンピュータ・出力装置で構成されている．これまで，交通管制システムは，現行の業務処理の流れ，各業務の利用機能，処理の発生状況（件数等），問題点，改善課題，ニーズ等を踏まえ，設設備を改修するといった対処療法が採用されてきた．しかし，交通管制システムに代表される情報システムは，モデルのライフサイクルが短いため，システムの建設費，供用後の維持費と修繕費，更新費の他，情報システムの技術的陳腐化，及びこれらの数多くある個々のシステム・機器の最適化（再構築）も考慮した更新戦略を検討する必要がある．以上の問題意識の下に，本章では，情報システムの最適更新戦略について近年のトピックスを把握することにより，交通管制システムの更新戦略手法を提案するとともに，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を示す．以下，**2.2** では本章の基本的な考え方を説明する．**2.3** では交通管制システムの更新戦略を提案する．**2.4** では高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を示す.

2.2　本章の基本的な考え方

2.2.1　従来の研究概要及び交通管制システムの更新戦略の必要性

これまで，交通管制システムは，現行の業務処理の流れ，各業務の利用機能，処理の発生状況（件数等），問題点，改善課題，ニーズ等を踏まえ，既設システムの機能を追加開発，或いは新たな機能を有するサブシステムを次々に構築するといった対処療法が採用されてきた．しかし，このような改修を繰り返し，継ぎ接ぎだらけとなった交通管制システムは，業務効率の低下を招くとともに，システムの保守・運用を困難なものとしていた．特に，2007年前後に、日本の情報化を牽引したベテラン・エンジニアが一気に引退

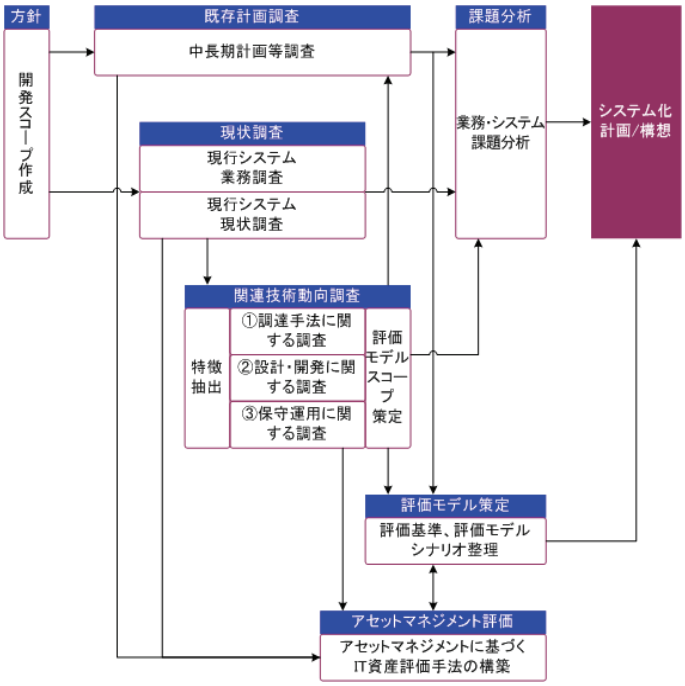


図 2-1 交通管制システムの更新戦略の全体構成

することに起因する「2007年問題」も事態を深刻にしており，プログラムの保守・運用が立ち行かなくなるのではと危惧されている．交通管制システムに代表される情報システムは，モデルのライフサイクルが短く，このような問題を有していることから，システムの建設費，供用後の維持費と修繕費，更新費の他，情報システムの技術的陳腐化，及びこれらの数多くある個々のシステム・機器の最適化（再構築）も考慮した更新戦略を検討する必要がある．

2.3 交通管制システムの更新戦略

2.3.1 交通管制システムの更新戦略の全体構成

前述のように，情報システムの世界では，システムの最適化（再構築）も考慮した更新戦略の検討が必要となっている．

本研究では，システムの更新戦略の検討工程を大きく2つに大別したものを提案する．１つめは，情報システムの最適更新戦略に向けた各種調査，評価モデル・システムの最適化（再構築）計画案作成工程であり，本工程に関する具体的な内容は本項に示す．２つめは，ここで検討されたシステムの最適化（再構築）計画案を定量的かつ客観的に評価する工程であり，将来時点の維持費と修繕費，更新費の他，情報システムの技術的陳腐化を予測し，最適な対策工法と対策時期を選定することにより，情報システムの計画的かつ効率的な更新戦略を策定するアセットマネジメント評価プロセスであり，本工程に関する具体的な内容は**3章**以降に示す．

交通管制システムの更新戦略の全体構成を**図 2-1** にまとめる.

2.3.2 既存計画調査

中長期計画及び今後導入が予定されている関連事業や新規サービス内容，交通管制の高度化，コスト目標及び業務体制等各種施策等について調査を行なう.

2.3.3 現状調査

現行の業務処理の流れ，各業務の利用機能，処理の発生状況（件数等），問題点・改善課題・ニーズ等，並びに現行の業務処理フロー，並びにシステムの物理的及び論理的構成，システム毎の取扱データ内容及びデータ量，機器及びソフトウェアの導入時期・費用，システム構成の妥当性，重複機能及びデータの存在，標準的・汎用的でない技術の存在について調査を実施する.

2.3.4 課題分析

既存計画調査及び現状調査の結果に基づき，現行業務及びシステムに関する課題の分析を行なう．分析は主として，システムの機能・構成面，システムの導入プロセス面，システムの及び保守・運用面に着目して行う.

2.3.5 関連技術動向調査

前項までの調査等を踏まえた上で，情報システムの最適化を目的に，関連技術動向調査を実施する．本調査は，システムそのものを最適化する「設計・開発に関する技術」と，システムの調達から運用・管理に至るプロセスを最適化する「調達・管理技術」に大別できるが，これらは不可分な関係にあるため，情報システムを円滑・効率的に構築するには，この双方について近年のトピックスや主要技術，及び参考となる事例を調査し，これらの調査成果をもって，システムの最適化（再構築）の妥当性を検証するために必要な評価項目・視点を整理する．**表 2-1** に情報システムの最適更新戦略に関する近年のトピックスをまとめる.

関連技術動向調査では，これらの最新技術や参考となる事例を調査し，交通管制システムの整備計画を立案するために，**図 2-2** システム・ライフサイクルと関連技術必要な視点・評価項目を整理していく．このように，システムの最適更新戦略への取組は一過性のものではなく，最適化実施の評価を通じて不断の改善を行っていくとともに，最適化実施途上においても，その時点における最新の技術動向や社会経済情勢の変化等を踏まえた改善を行っていくことが重要であり，そのためにも、システム・ライフサイクルの確立が極めて重要となる

調査候補事例		概　要
設計・開発に関する技術	BPR Business Process Re-engineering	設定した目標を実現するために組織や処理の流れを根本から見直し，業務を最適化する手法で，現状にとらわれない抜本的な改革の手法として注目されている．
	UML Unified Modeling Language	国際的な標準化団体OMGにより標準化されたモデリング手法（複雑な事象等を構造化し図示する方法）であり，用途に応じた複数の手法を用意している．
	EA Enterprise Architecture	業務手順・組織，情報システム全体の最適化を図るための方法論で，近年，政府機関の大規模システムの見直しに際して利用されている．
	MDA Model Driven Architecture	標準化団体OMGが開発の効率化を目指し中長期の実用に耐えうるアーキテクチャとして提唱したもので，モデリング駆動型アーキテクチャと呼ばれる．
	RUP Rational Unfied Process	オブジェクト指向を前提とした開発方法で，従来のウォーターフォール型とは異なる反復型プロセスを持ち，要件が不透明な開発に適している．
調達・管理技術	RFI Request For Information	調達に先立ちベンダーに提案を要請するもので，計画段階において，システムのイメージや，ベンダーの対応力，費用等を把握することが可能となる．
	PMO Project Management Office	プロジェクトの管理を行う組織・サービスで，システム開発の場合は，調達支援からIT部門とベンダー間の意見調整や進捗管理等，プロジェクト全体の遂行を支援する．
	RFP Request For Proposal	自らの調達要求をベンダーに正確に伝え，ベンダーにシステムの提案を作成してもらうための提案依頼書．
	PMBOK Project Management Body Of Knowledge	米国の非営利団体PMIによりまとめられたプロジェクトマネジメントに関する知識体系で，国内外で広く普及．
	SLA Service Level Agreement	ITサービス提供者が利用者に提供するサービス品質の目標を明確化しそれを保証する制度．
	ITIL Information Technology Infrastructure Library	英国政府機関がとりまとめたITサービスの管理運用体系で，システム運用コストやサービス品質を向上する手段．

表 2-1　情報システムの最適化に関する近年のトピックス

1) 特徴抽出

現状調査の結果に基づき，システムの特徴を整理する．特徴はシステム構成全般として，システムの物理構成，処理機能，取り扱いデータ種別，外部データ連携について取りまとめるとともに，IT導入に至るライフサイクル最適化の観点から，調達，設計・開発，保守・運用といったIT導入プロセス毎に検討を行う．

2) 調達手法に関する調査

特徴抽出で整理した特徴を踏まえ，センター系で面的情報収集・制御等を行うシステムを中心に候補を選定する．それに基づき，システムの保守・運用，サービス水準の設定等の管理手法を中心として概要調査を行なう．対象としては，センター型で運用される国の大規模な事業系システム（通関システム，職業安定システム等）や航空管制システム，電力の制御システム等を想定する．

3) 設計・開発に関する調査

次に，特徴抽出で整理した特長を踏まえ，システムの導入を進めるに際して留意するべき設計及び開発関連技術の調査を行なう．設計及び開発関連技術の調査は，システム構成全般に関する考え方に着目し，分散型か集中型かというシステム・アーキテクチャや高い信頼性・稼働率が求められるシステムのセキュリティ（冗長化）技術を対象とするほか，開発プロセスを統制するために近年国の大規模システム開発で導入が進むPMO（Project Management Office）や開発管理技術の事実上の標準となっているPMBOK（Project

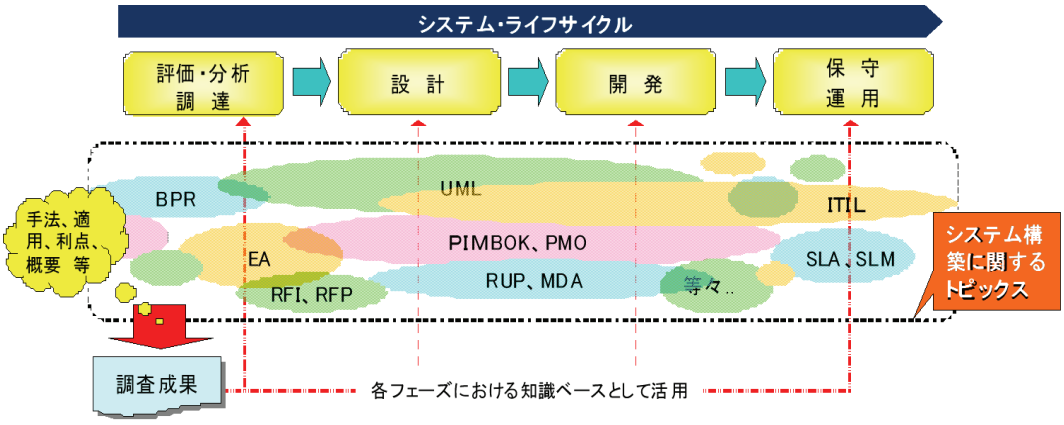


図 2-2 システムライフサイクルと関連技術

Management Body Of Knowledge）を行う．

4) 調達・管理関連技術に関する調査

特徴抽出で整理した特徴を踏まえ，システムの導入を進めるに際して留意するべき調達・管理関連技術の調査を行なう．具体的には，システム再構築時の主要分析手法として BPR（Business Process Re-engineering）や EA（Enterprise Architecture）に着目するとともに，近年の公共分野の IT 調達動向を踏まえ，業者選定方法，ハード・ソフト・開発・保守の各発注形態，及び RFI（Request For Information），RFP（Request For Proposal）といった調達プロセスを調査する．また，管理技術については，アウトソーシングを前提としたハウジングやホスティング等のシステム運用形態とともに，システムのサービス品質面の規程として近年導入が進む SLA（Service Level Agreement），ITIL（Information Technology Infrastructure Library）を対象とする．

5) 評価モデルスコープ策定

以上の調査結果を踏まえ，評価モデルスコープ策定として，システム評価に際して着目すべき評価項目の範囲を明確化したうえで，調達，システム構成，開発手法，保守運用，実施体制等システム評価項目を策定する．システム評価項目については，システム構築に際して取りうる代替案で構成し，各代替案の概要とともに，各々のメリット・デメリット及び留意点を整理する．

2.3.6 評価モデル作成

関連技術動向調査の結果を踏まえ，中央局システムの管理を最適化するために考慮すべき評価項目，評価基準，評価要領等を「評価モデルシナリオ」として整理する．これら評価モデルは，関連技術動向調査

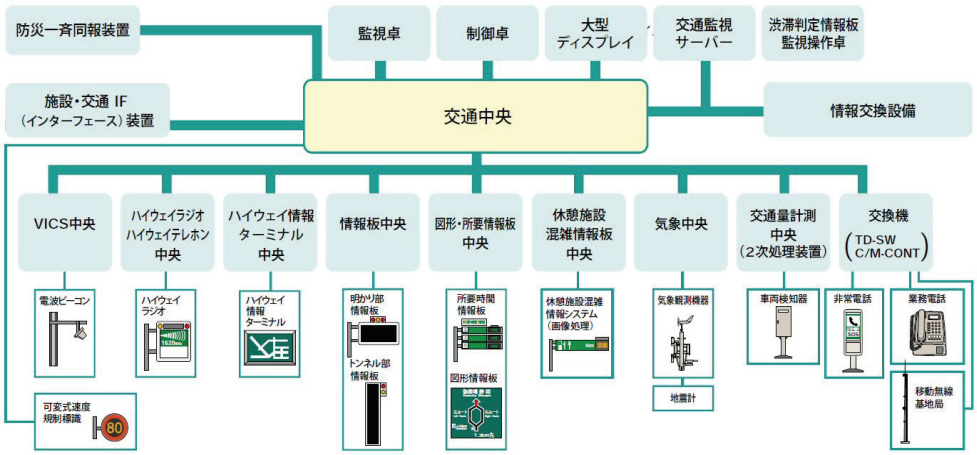


図 2-3　交通管制システム全体

で整理した評価モデルスコープを前提に，交通管制システムの特徴に適した選択肢を選定し構築する．この際，良し悪しを判断する基準として，経営面からの政策的な判断，技術面の優劣・適性に基づく判断，経済面からのアセットマネジメント評価にもとづく判断を想定する．

2.3.7　アセットマネジメント評価

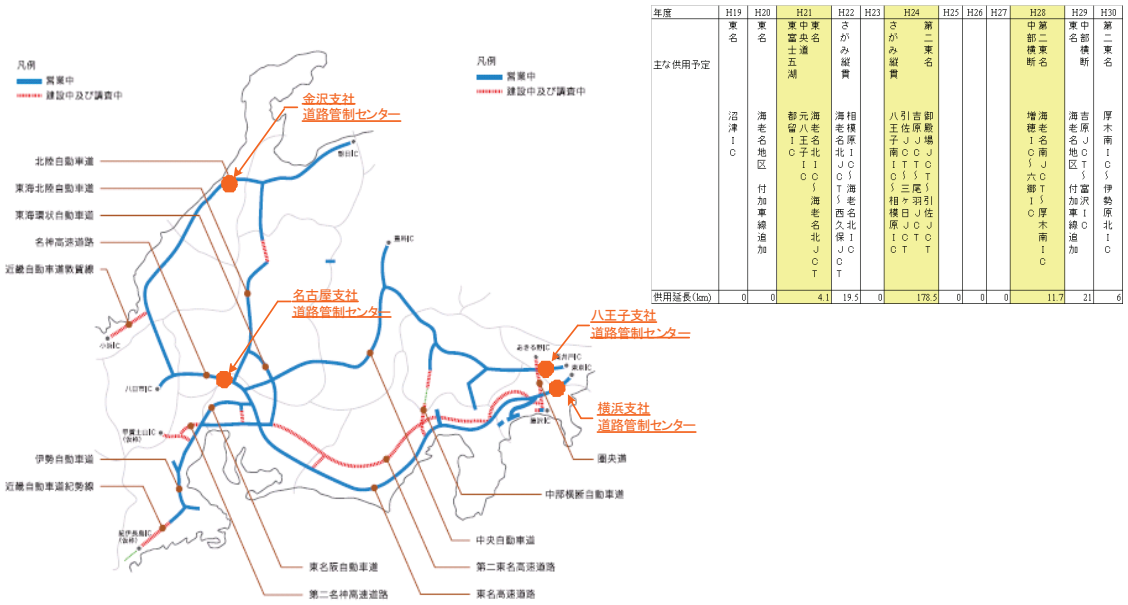
評価モデル策定による評価基準，評価モデルシナリオに基づき，アセットマネジメントを行い中央局システムの更新方式及び更新時期等の評価を行なう．なお，これらに関する研究は，**3章**以降によるものとする．

2.4　適用事例

2.4.1　適用事例の概要

中日本高速道路株式会社横浜支社が管理する交通管制システムを対象として，交通管制システムの更新戦略に適用する．

同支社の交通管制システムは，メインフレームを配置し，データの処理や用途毎に，中間的な情報処理を行う中央局システム（以下，部局と呼ぶ）を配置した分散型システムで構成され，高速道路の運行状況を管理し，利用者に対して適切な情報をリアルタイムで提供している．**図 2-3** に交通管制システム全体の機能構成を示す．本章では，交通管制システムを対象として，既存計画調査，現状調査，課題分析，関連技術動向調査，並びに評価モデルの作成を行った．



年度	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30
主な供用予定	東名 沼津IC	東名 海老名地区 付加車線追加	東名 東中道 東富士五湖 海老名北IC～海老名北JCT 元八王子IC～都留IC	さがみ縦貫 海老名北IC～海老名北JCT 海老名北JCT～西久保JCT		第二東名 御殿場JCT～引佐JCT さがみ縦貫 引佐JCT～三ヶ日JCT 八王子南IC～相模原IC				第二東名 海老名南JCT～厚木南IC 中部横断 増穂IC～六部IC	中部横断 吉原JCT～富沢IC 海老名地区～付加車線追加	第二東名 厚木南IC～伊勢原北IC
供用延長(km)	0	0	4.1	19.5	0	178.5	0	0	0	11.7	21	6

図 2-4 中日本高速道路株式会社の供用計画

1) 交通管制システムの概要

交通管制システムは，交通中央局をメインフレームとし，複数の収集系部局及び提供系部局によって構成している．これは，取り扱うデータの処理内容や端末設備が異なることや，取り扱う情報量などを考慮し，データ収集の端末設備及び情報提供の端末設備の種類毎に機能を分散して，複数の部局を構築したものである．交通中央局は，収集系部局からの諸情報及び通信員が手動によって入力した情報を処理し，他機関や提供系部局へ道路交通状況の情報として配信している．収集系部局は交通量計測中央局と気象中央局から構築される．交通量計測中央局では，高速道路上に設置している車両検知器からの交通量データを収集し，渋滞情報や所要時間情報などの交通管制及び情報提供に必要な情報の処理を行っている．気象中央局では，高速道路上に設置している気象センサー及び地震計測データを収集し，異常気象や地震判定などの交通管制及び情報提供に必要な情報の処理を行っている．提供系部局は情報板中央局，ハイウェイラジオ中央局，路車間情報中央局，情報ターミナル中央局から構築される．これらサブ中央局システムは，情報を提供する端末設備の種類に応じて構築したものであり，交通中央局からの道路交通状況の情報を受けて，提供する場所や端末設備の種類に応じて，情報を編集し配信している．交通中央局，収集系部局，提供系部局は複数の電子計算機を用いた運転監視システムである．交通管制システムの特徴としては，部局毎に開発事業者が異なるマルチベンダーシステムであることが挙げられる．ハードウェアやソフトウェアなどは開発事業者によって異なり，また，各々の中央局の導入時期や更新のタイミングも異なるため，複数の年代の中央局装置が混在している．また，データのフォーマットなどが統一されていないため，各部

表 2-2 システム保守運用にかかる関係者

分類	種 別	細 目	業務概要	業務の必要性	NEXCOにおける実施状況
ユーザーサポート	ユーザー教育	操作マニュアル作成 操作講習会の実施	システム利用の促進	ユーザーのシステム利用率を向上させシステム化効果をより高いものにする．	メーカー
	ヘルプデスク	「問合せ」「障害連絡」の受付・対応業務及び記録，原因分析	ITILサービスサポートに準じた管理（インシデント，問題，変更，リリース，構成）	システムに生じた問題を認識・管理することでシステム・業務の改善に結びつける．	－
運用管理	オペレーション	システムの運転に伴う種々の定常業務の遂行	システムの起動・終了，ログの収集・分析，稼動監視，バックアップ・レストア等の定常的作業遂行	システムを安定的に運用するために，日々の状況を把握	－
	障害管理	発生した障害の検知から，保守部隊の対応完了までの状況管理	ITILサービスサポートに準じた管理（インシデント，問題，変更，リリース，構成）	保守部隊のサービス品質向上．次期システムへの改善ポイントの把握	保全管理員，メーカー
	データ管理	アクセス権限の設定，バックアップサイクル，データ収容媒体の保管	データの確実な保全	障害回復後の業務の迅速な復旧	－
	資産管理	HW，SW資産状況の管理	システムに関わる資産管理．整備状況を把握し，過不足状況を確認	投資対効果，次期投資予算の算定基礎資料作成	NEXCO職員
	セキュリティ管理	システムへのアクセス権限管理，サーバールームなどへの入退室管理	セキュリティログの収集・分析．システム・データへの不正アクセスの監視，対策検討	システムの安定稼動，データ及びシステムの外敵よりの保護	NEXCO職員
	構成・変更管理	ハードウェア，ソフトウェアの構成とその変更状況を管理	ソフトウェアのバージョン管理，ドキュメント類との整合性管理，ハードウェアの接続状況管理資料作成	問題分析の迅速化，復旧対策立案の支援	保全管理員，メーカー
保守	HW保守	HW定期点検	定期的な機器の点検，清掃，消耗品の交換	障害の発生防止	保全管理員
		HW障害対応	機械上の故障・不具合の対応	障害の復旧	保全管理員
		HW予防保守	HMC（マイクロコード，BIOS）等の更新	障害の発生防止	メーカー
	SW保守	SW予防保守	OS/ミドルウェアのパッチ適用	障害の発生防止	メーカー
		SW障害対応	適用業務プログラムの不具合の修補 システムソフトのバグ対応	障害の復旧	メーカー
	契約管理	契約管理	製品・ライセンスの数量，個々の製品の保守契約の管理	障害対応の迅速化，運用環境の管理	保全管理員，メーカー

局で重複した機能やマスタデータが存在している．このため，路線延伸などに伴う改造においては，ソフトウェアの修正や処理装置の増設などと，その対応は様々であり，開発事業者によっても対応が異なる．

2.4.2 既存計画調査結果

既存計画調査では，中日本高速道路株式会社が今後予定している計画や施策などを把握することを目的に，現時点で明確になっている供用路線計画，情報提供運用などについて調査を行った．**図 2-4** に中日本高速道路株式会社横浜支社の供用計画を示す．中日本高速道路株式会社横浜支社が建設管理する区間における新規供用路線としては，第二東名高速道路，首都圏中央連絡自動車道が計画されている．

2.4.3 現状調査結果

現状調査は，交通管制システムに関する完成図書や業務マニュアルなどの図書による情報収集，交通管制システムを納入した開発事業者を対象にした保守対応期限の調査，並びに交通管制システムの保守を行っている保全管理員を対象にした故障履歴データベースの調査を実施した．また，現状の中央局システムに対する問題点や課題を整理するために，中央局システムの保守運用に係わる関係者を対象にヒアリング調査を実施した．**表 2-2** にシステム保守運用に係わる関係者をまとめる．

表 2-3 故障発生時の影響

影響度	備　考
◎:影響が無かった.	・利用者への情報提供に影響を及ぼさなかった.
○:一部の提供設備に対し，情報提供ができなかった.	・ある地点の情報提供施設に影響があった. ・ある地点の情報が提供されなかった.
△:管内の提供設備に対し，情報提供ができなかった.	・複数の施設や特定の路線など，比較的広範囲にわたる情報提供施設に影響があった. ・複数の施設や特定の路線など，比較的広範囲にわたる情報が提供提供されなかった.
×:全ての提供設備に対し，情報提供ができなかった.	・川崎管制が管轄する全ての情報提供施設に対して影響があった.

1) 現状調査結果

交通管制システムに発生した障害は，保全管理員によって故障履歴として管理されている．本調査では，保全管理員が管理している故障履歴のデータを収集した．故障履歴の調査結果で確認できた交通管制システムの故障部位は，ハードディスク，電源部，処理部本体，ソフトウェアに分類することができた．これら部位は，各中央局装置で共通的に使用されているため，経過年数と発生した故障件数の関係を確認することによって，劣化傾向を把握することが可能であると考えることができる．ハードディスクは回転軸と記録基板から構成されている．故障の原因は軸受けやディスクの劣化であるため，磨耗特性がある部品であると考えられる．パソコン制御監視システムの導入・保守ガイドラインでも寿命のある部品として分類されている．電源部はアルミ電界コンデンサが用いられている．このコンデンサの特性によって電源部の寿命が決まるため，磨耗特性がある部品であると考えられる．パソコン制御監視システムの導入・保守ガイドラインでも寿命のある部品として分類されている．処理部本体はメモリやCPU，集積回路などを組み込んだ基板によって構成されている．パソコン制御監視システムの導入・保守ガイドラインでは，偶発故障期間（故障率がほぼ一定と見なせる期間）が長く，通常使用期間中には摩耗故障期間には到達しないものに分類されている．ソフトウェアは物理的な劣化は無い．ただし，負荷の増大などによって当初想定していた処理能力を超えたり，接続する周辺装置の更新や新たなシステムとの連携などによって陳腐化が生じる．交通管制システムでは，路線延伸などに伴う改造が通年的に行われているため，この結果としてソフトウェアの技術的陳腐化が生じ，磨耗故障に似た傾向となると考えられる．本章で調査した故障履歴に基づく交通管制システムの故障部位の劣化ハザードモデルに関しては，**3章**の適用事例によられたい．

2) 故障発生時の影響

交通管制システム故障発生時の影響は，現地でのヒアリング結果から利用者への影響（サービス面），他機関への影響，業務への影響（運用面）があることがわかった．それぞれの影響については，故障による

表 2-4 保守対応が困難になる割合

中央局名	部品総数	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25以降（予想）
①交通中央局	148	19%	19%	19%	19%	19%	63%	100%
②情報板中央局	459	21%	25%	25%	25%	25%	25%	100%
③ハイウェイラジオ中央局	268	32%	57%	63%	63%	63%	66%	100%
④路車間情報中央局	131	37%	46%	48%	50%	50%	50%	100%
⑤情報ターミナル中央局	74	51%	91%	100%	100%	100%	100%	100%
⑥気象中央局	59	66%	66%	100%	100%	100%	100%	100%
⑦交通量計測中央局	72	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
⑧施設中央局	218	13%	25%	100%	100%	100%	100%	100%
⑨ITV中央局	19	0%	0%	0%	100%	100%	100%	100%
⑨ラジオ再放送中央局	40	0%	0%	0%	38%	38%	50%	100%
全体	1488	30%	39%	53%	56%	56%	61%	100%

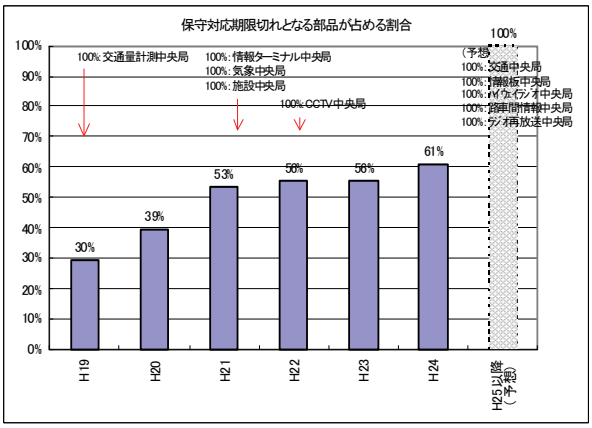


図 2-5 保守対応が困難になる割合（交通管制システム全体）

機能停止の範囲や時間などから4段階に分類することができた．その分類を**表 2-3** にまとめる．

3) 保守対応期限

交通管制システムの開発事業者に対し，システムを構成している装置及び部品を明確にし，これら部品の保守対応期限の調査を実施した．調査の結果，各開発事業者共に保守対応を打ち切る旨の提示は無く「可能な限り保守を続ける」との回答であった．ただし，製造中止になった製品については在庫状況に応じた保守対応となるため，在庫がある限り保守ができる期間と，在庫が少なく保守対応が困難になると予想する年度を確認することができた．今後の保守状況で「保守対応が困難になる」として回答があった部品数を年度別に集計し，各中央局を構成する全ての部品数で除した結果（保守対応が困難になる割合）を**表 2-4** にまとめる．さらに，**表 2-4** の結果を基に交通管制システム全体で「保守対応が困難になる」として回答があった部品数を年度別に集計し，全ての部品数で除した結果（保守対応が困難になる割合）を**図 2-5** にまとめる．この結果から，平成21年度で約半数の部品が供給困難になり，故障発生時の復旧が困難になる

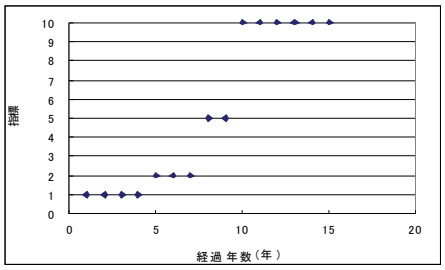


図 2-6 機能停止時間の指標

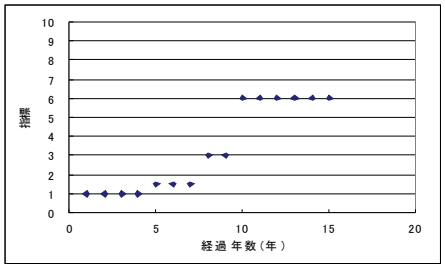


図 2-7 交換部品の調達時間の指標

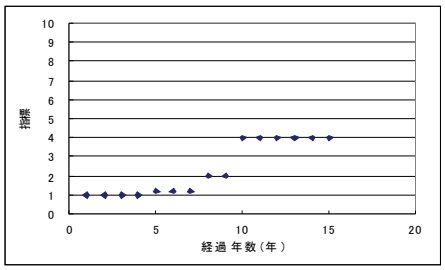


図 2-8 技術者の対応時間の指標

ことが確認できた.

また，開発事業者から回答された「保守対応が困難」になった場合の影響についても調査を実施した結果を以下にまとめる．ハードウェアの保守対応期間は，故障発生時の復旧，オーバーホールなどに対応出来る期間であり，標準製品に対しては製品毎にその期間が定められる．保守期限は，部品枯渇，製造設備維持費用，製造設備保守停止対応費用，需要低下，技術者確保難，技術者確保費用などの状況により決定される．ソフトウェアの保守対応期間は，故障要因調査，不適合修復などに対応出来る期間であり，標準製品に対しては製品毎にその期間が定められる．また，バージョンアップが行われた場合，旧バージョンの保守が停止となり，新バージョンで保守対応となることがある．ソフトウェアは劣化しないので保守期限後も使用継続できるが，故障対応で支障をきたすことがあるので注意が必要である．保守期限は，技術者確保難，技術者確保費用，開発設備維持費用，開発設備保守停止，開発設備保守停止対応費用，需要低下などの状況により決定される．保守期間満了後は開発事業者からハードウェアの保守部品を入手できな

表 2-5 故障復旧費用

部位	交換費(円)	人件費(円)	復旧概要
ハードディスク	1,000,000	500,000	ハードディスクの故障は，ハードディスクを交換することによって処置する．修理は開発事業者への修理依頼によって行われ，修繕費用としてはハードディスク本体の費用と人件費がかかる．
電源部	500,000	200,000	電源部の故障は，装置に内蔵している電源ユニットの交換によって処置する．修理は開発事業者への修理依頼や予備品の交換などによって行われ，修繕費用としては電源ユニットの費用と人件費がかかる．
処理装置本体	300,000	200,000	処理装置本体の故障は，処理装置に内蔵している各種基板を交換することによって処置する．基板交換は開発事業者への修理依頼によって行われ，修繕費用としては各種基板の費用と人件費がかかる．
ソフトウェア	-	500,000	ソフトウェアの障害は，障害の原因となった箇所のソフトウェアの修正，設定の変更，ソフトウェアの再インストールなどによって処置する．これらの処置は開発事業者への修理依頼によって行われ，修繕費用としては人件費のみがかかる．

くなり，またソフトウェアのサポートも受けられなくなる．したがって，保守期間満了後もシステムを継続使用する場合には，ユーザによる保守部品の確保，技術者の確保などが必須となる．保守期間満了後に保守部品が必要となった場合は，ユーザが保有する相当品を保守部品とする，更新または撤去した自社システムから保守部品を抜き取る，他ユーザで遊休化した保守部品を入手する，他ユーザが更新または撤去したシステムから保守部品を抜き取る，同一品を製作するといった方法で保守部品の確保を行うことになる．しかし，このような保守部品の確保は，保守部品化できるものの数（残数）には限りがあること，残り少ない物を探すには時間と費用がかかること，廃止製品に対する開発事業者の技術支援は弱くなること，技術支援が弱くなった製品に対するサポートには時間と費用がかかること，から復旧までにかなりの影響が発生する可能性がある．以上の開発事業者における保守対応に対する考え方などから，保守期限を迎えたシステムでは，復旧に要する時間と費用が増大する傾向があることがわかった．開発事業者に対する中央局システムの保守対応期限調査では，各社ともに具体的な保守対応期限の提示がなかったため，各システムの開発事業者は様々な方法により可能な限りシステムの保守を継続すると考えられるが，設置からの経過年数が長いシステムにおいては，以下の影響が顕著になると推測される．

機能停止時間：交換部品の調達や技術者の対応時間によるため，設置当初は短時間であるが，ある年度から大きく増加する傾向（**図 2-6** 参照）になると考えられる．なお，**図 2-6** における指標は，設置当初の保守対応に伴う機停止時間を基準とした場合，経過年数に応じた機停止時間の増加傾向を示すものである．

交換部品の調達時間：主にハードウェアの部品調達に要する時間で，保守部品の枯渇により調達の時間が増大する．保守部品は製造中止から在庫の減少が始まり，在庫が無くなると同など品を探さなければならないため，設置当初は短時間であるが，ある年度から大きく増加する傾向（**図 2-7** 参照）になると考えられる．なお，指標の定義は機能停止時間に準じるものとする．

技術者の対応時間（費用）：主にソフトウェアの改修や調査による時間で，開発環境や技術者の減少によ

表 2-6 交通管制システムの特徴

システム導入プロセス	現状システムの特徴	問題点・課題・一般的見解
1.分析	・NEXCOでは，細分化された発注単位毎に多数のシステム導入が進められている．	・個別最適に伴う下記弊害が懸念される． －マスタデータの二重管理 －サブシステム間データ連携における非効率 －データコードの違いによる変換処理の多発 など ・これらの非効率は経済的に効率の悪い負担を強いる結果となる．
2.調達	・今回システム再構築範囲としている中央局システムおよび中央サブシステムは，音声系，テキスト系，画像系などのデータ処理が中心である．	
	・道路設置装置やそれらのデータ処理に係るS/Wとの関係上，H/Wが特定のものに限られる可能性は否定できない．	
	・NEXCOは一括発注で行っている．	・近年のIT調達では，競争性を高め，コスト抑制を目的に，汎用的なH/W製品についてはソフトウェアと分離して調達するのが主流となっている．ハードウェアへの依存度が高いソフトウェアの場合には，稼働保証の面から一括で調達が行われる．
	・NEXCOでは，内部職員，外注要員を含め，保守運用に当たっている．内部職員が全般を見るとともに，H/Wについては保全業務としてアウトソーシングを行っている．	・保守運用負担が高止まりしている原因は，別項に記すシステムの責任分解の曖昧さやサブライヤの多さ，それにともなう調整確認作業の増大，システムの管理機能が必ずしも十分でないことなどを総合的に勘案する必要がある．
	・S/Wは特に保守契約をせず，障害発生の都度開発事業者に対応依頼している．	・S/Wについては，軽微なプログラム修正でも都度個別に発注手続きをしなければならない煩わしさが指摘されている． ・結果的に競争が行われずに随意契約で調達されていることに遠因があると推測される．
		・システム開発の場合，開発費のみの評価で調達を行うと，保守運用費の高止まりにより運用期間中のトータルコストが割高になる可能性がある．国の調達制度見直しの中でもこの点が指摘されている．イニシャルコストとランニングコストをあわせたライフサイクルコスト(LCC)を最小化することが望ましい．
	・保守運用要件が開発時に反映されていない．	・障害発生時の障害切り分けが容易でないことや，システム改修の際の拡張要件および保守運用要件が十分に明示されていないなどの面で，システムの保守運用に係る担当者の負担が大きいことが問題として指摘されている．
	・NEXCOでは自ら開発管理を実施しているが，RFIや要件を詳細化したRFPによる開発，あるいは開発と保守運用の一括発注は行われていない．	・保守担当者からは，開発事業者が多く管理対象が多いため，障害やシステム改修の影響範囲の特定，開発事業者間の調整の煩雑さも指摘されており，このような拡張性や保守性を担保する工夫や，調達範囲の最適化検討は，ITの革新サイクルの早さに鑑み，ユーザ側の検討には限界があると考えられる．
3.設計	・メインとなる処理装置を中央に配置し，データ処理体系に応じた複数のサブシステムによって構築した分散システムである．	
	・情報収集，情報提供などのサブシステムは端末に応じて構築している．	
	・川崎と八王子に同様の中央局が存在している．	
	・各中央局システムの処理装置は，ホットスタンバイデュプレクス方式による二重化が行われている．	
	・交通管制システムは道路に設置される情報板やセンサなどの装置類とそれらから集められた情報の一次演算システム，主演算システム，それらの結果を表示するモニタにより構成されるが，今回の調達対象はデータの演算処理系で，純粋な情報システムとしての性格が強い．	・運用中の既存システムとの連携や，同時に複数のサブシステム機能群を調達するなど，結合～総合試験や移行プロセスが複雑になることが予想される．こうした状況の中では，ITに基づく開発管理スキルが不可欠である．
	・NEXCOでも開発推進チームを中心に開発管理を行っているが，工事としての作業管理が中心であり，必ずしもシステム開発に特化しているわけではない．	・本開発では，PMOの項で記載したように比較的複雑な条件を有する開発プロジェクトになると考えられることから，広く普及しているシステム開発管理手法を参考に，漏れなく必要なことを実施できるよう，体系だった管理を行うことが望ましい．特に要件を詳細に提示することにより，その履行や実現品質を適切に把握していくことが重要となるからである．
4.保守	・システムの運転管理はNEXCO職員及び運転監視員が行い，必要に応じて開発事業者にサポートを依頼することになっている．	
	・NEXCOでは，稼動期間や情報更新，障害保守，定期点検に一定のルールを設けているが，保守・運用サービスに関する定期的かつ十分な報告体制など，明示的な品質基準は整備されていない．	・システムの可用性や性能など，システムの健全度や改善のために必要な情報が不足し，保守運用業務が，日常の障害・課題消しに終始し，何かあるごとに開発事業者に発注を行わざるを得ない状況となっている．こうした状況が保守運用コスト高止まりの遠因にもなっていると推測される．
	・現状の保守運用業務は，職員および保全委託会社が行っている．ヘルプデスクなら業務処理は職員が窓口となり，障害は委託会社の保守員が窓口となる．障害対応に関して，保守員からメーカー担当に連絡し対応を図るなど，一定の体制・プロセスを有している．	・このように，個々には対応を行っているが，下記のような問題指摘もあり，必ずしも体系的・網羅的に体制整備されているわけではなく，職員や保守員の経験に依存する面も少なくない． －開発元技術者への依存度が高くスケジュールも当該技術者に制約される． －メーカー数が多く問い合わせ対応や調整に労力を要する．

り対応時間が増大する．主流となる開発言語の変化によって技術者のニーズも変化し，当時の技術を有する技術者が減少することや，開発環境なども同様に変化するため，設置当初は短時間であるが，ある年度から大きく増加する傾向（**図 2-8** 参照）になると考えられる．なお，指標の定義は機能停止時間に準じるものとする．また，費用について，周知の事実から，旧言語と新言語の2種類の技術を有す技術者の単価が，新言語2種類の技術を有す技術者の単価よりも約1．5倍高いことがわかった．

4) 故障復旧費用

故障復旧のための費用は，故障部位として確認できたハードディスク，電源部，処理部本体，ソフトウェアに対する処置内容並びに交通管制システム供用開始後の経過年数によって異なるが，調査の結果確認で

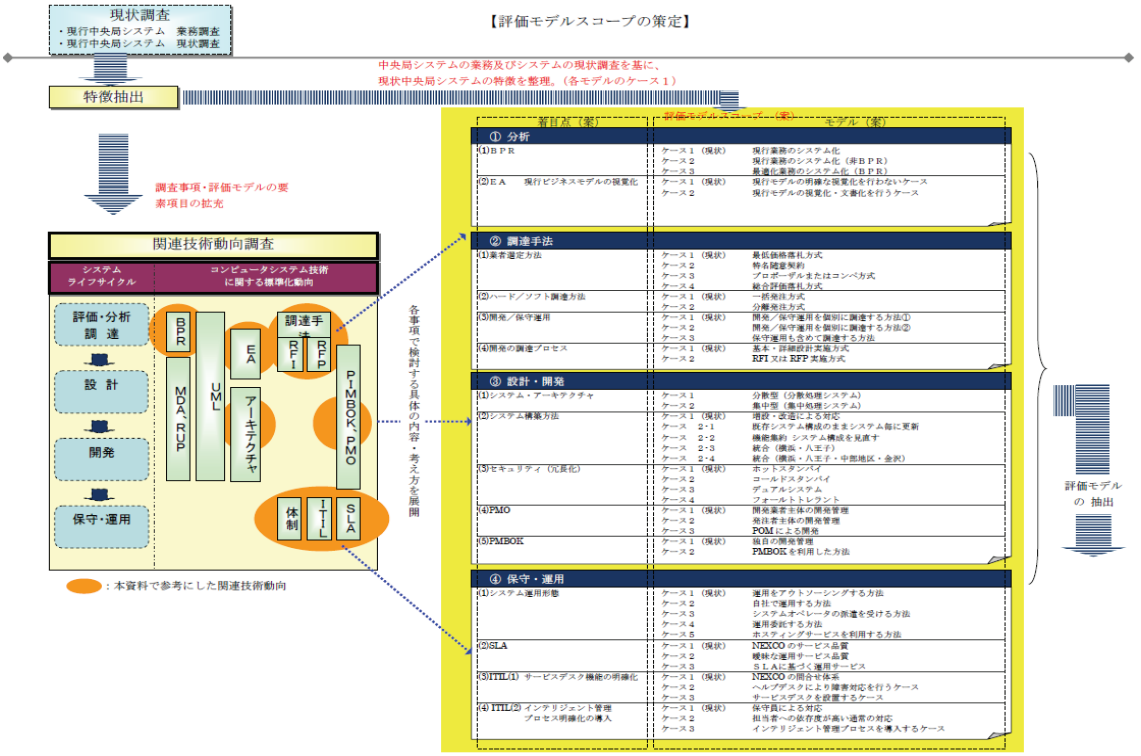


図 2-9　評価モデルスコープの策定

きた保守対応期限内の故障時の復旧費用を**表 2-5** にまとめる.

2.4.4　関連技術動向調査結果

1) 特徴抽出

関連技術動向調査を実施するにあたり，現状調査で整理した中央局システムの現状分析を基に，交通管制システムの特徴をシステム・ライフサイクル毎に**表 2-6** にまとめた.

2) システム設計開発に関する技術動向の調査

交通管制システムの特徴抽出の結果を踏まえ，システムの導入を進めるに際して留意するべきポイント，システム管理手法などについて抽出した.

3) 評価モデルスコープの策定

以上，システム・ライフサイクルの各フェーズにおいて調査した技術動向を基に，中央局システムの整備計画の評価モデルスコープとして整理した結果を**図 2-9** 評価モデルスコープの策定にまとめる.

表 2-7 評価モデルの選定

システム導入プロセス	評価モデル項目	代替案					選定ビュー		
		ケース1（現行方法）	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	経営	アセット	技術トレンド
分析	(1) BPR	現行業務・経営計画に基づくシステム化	現行業務のシステム化（非BPR）	最適化業務のシステム化（BPR）					○
	(2) EA（業務・システムの最適化）	ヒアリング調査・施策に基づく構想策定	EAを利用した最適化検討						○
調達	(1) 業者選定方法	最低価格落札方式	特名随意契約	プロポーザルまたはコンペ方式	総合評価落札方式		○		
	(2) ハード／ソフト調達方法	一括発注方式	分離発注方式				○		○
	(3) 開発／保守運用	開発／保守運用を個別に調達する方法①	開発／保守運用を個別に調達する方法②	保守運用も含めて調達する方法			○		○
	(4) 開発の調達プロセス	基本・詳細設計実施方式	RFI又はRFP実施方式				○		○
設計・開発	(1) システム・アーキテクチャ	分散型（分散処理システム）	集中型（集中処理システム）					○	○
	(2) システム構築方法	増設・改造による対応	既存システム構成のままシステム毎に更新	機能集約システム構成を見直す	統合（横浜・八王子）	統合（横浜・八王子・中部地区・金沢）		○	
	(3) セキュリティ	デュプレックス（ホットスタンバイ）	デュアルシステム	クラスタリング	フォールトトレラント			○	○
	(4) PMO	開発業者主体の開発管理	発注者主体の開発管理	POMによる開発管理					○
	(5) PMBOK	独自の開発管理	PMBOKを利用した方法						○
保守・運用	(1) システム運用形態	NEXCOの運用方法	自社で運用する方法	システムオペレータの派遣を受ける方法	運用委託する方法	ホスティングサービスを利用する方法	○		○
	(2) SLA	NEXCOの運用サービス品質	曖昧な運用サービス品質	SLAに基づく運用サービス			○		○
	(3) ITIL(ITサービス品質の維持・向上活動)	意識しないが部分的に実施するケース	ITILに照らして体制整備するケース				○		○

2.4.5 評価モデル作成

表 2-7に，評価モデルスコープとして整理した代替案と推奨モデルを示す．本表において，選定ビューの欄は，経営的な判断に基づく「経営」，アセットマネジメントの考察に基づく「アセット」，技術面の検討に基づく「技術トレンド」のいずれの視点で方針検討されるかを示す．例えば,「経営」に”○”が記されている場合には，経営判断に基づくことを示す．また,「アセット」,「技術トレンド」の双方に”○”が記されている場合には，双方の判断を加味して方針が検討されることを示す．

多くは技術的な視点により方針が検討されるが，調達における業者選定方法については，アカウンタビリティや国の施策の影響も大きいため，経営による判断が必要と思われる．設計開発におけるシステム・アーキテクチャ，システム構築方法については，技術的に，システムの詳細分析等を経て検討されるべきものであり，現段階で技術的な視点のみで方針を設定するのは困難である．一方，アセットマネジメント評価の観点からはシステムの最適化（再構築）計画案を定量的かつ客観的に評価することにより，一定の示唆を得ることが可能である．本評価に関する具体的な内容は**3章**以降に示す．

保守・運用におけるシステム運用形態については，ハードウェアの所有も外部委託する方式など，現行資産の取り扱いが関係してくる．また，外部にシステムの実態を設置する場合，障害が発生した際に，社員がシステムを直接扱える環境に迅速に移動することか困難なケースも想定され，社会的に影響の大きいシステムを管理する機関として，政策的な判断が求められる．このため，本項については経営による判断

が必要と思われる．これらを踏まえた上で，技術トレンドに基づき評価した．

2.5 結言

本章では，交通管制システムの建設費，供用後の維持費と修繕費，更新費の他，情報システムの技術的陳腐化，及びこれらの数多くある個々のシステム・機器の最適化（再構築）も考慮した更新戦略手法，及びその検討工程を大きく2つに大別したものを提案した．

１つめは，情報システムの最適更新戦略に向けた各種調査，評価モデル・システムの最適化（再構築）計画案作成工程とし，２つめは，検討されたシステムの最適化（再構築）計画案を定量的かつ客観的に評価する工程であり，将来時点の維持費と修繕費，更新費の他，情報システムの技術的陳腐化を予測し，最適な対策工法と対策時期を選定することにより情報システムの計画的かつ効率的な更新戦略を策定するアセットマネジメント評価プロセスとした．

さらに，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を通じて，提案したシステム・機器の最適化（再構築）も考慮した更新戦略の実効性を確認した．

第3章

ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデル

3.1 緒言

大規模な社会基盤施設では，オペレーションの効率化や利用者への迅速な情報提供を目的として，各種のモニタリング装置，コンピュータ・出力装置で構成される情報システムが設置されている．情報システムのアセットマネジメントは，社会基盤施設と同様に重要な問題である．情報システムのアセットマネジメントで留意すべき点として，1）情報システムが膨大な数の機器群で形成される大規模システムであること，2）システムが階層構造を有しており，個々の機器の故障が施設全体の故障に発展する可能性があること，3）情報システムの物理的劣化だけでなく，陳腐化等に代表されるようにシステムの機能的劣化も重要な管理項目となること等があげられる．

情報システムのアセットマネジメントを実施する場合，**3.2.2**で議論するように，1）機器レベル，2）システムレベル，3）機能レベルという，マネジメントレベルの差異に配慮することが必要である．アセットマネジメントの視点としては，後者になるほど，より総合的な検討が必要となる．このうち，本章では，大規模情報システムを構成する機器レベルの故障解析を実施するためのランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを開発する．もとより，情報システムのアセットマネジメントを実施するためには，個々の機器レベルでの故障解析では不十分であり，上述の３つの課題を同時に達成できるような方法論を開発することが必要である．その中で，本章で提案する機器レベルでの故障解析モデルは，大規模情報システムの総合的なアセットマネジメントシステムを構築するための基本的な分析道具として位置づけられる．

情報システムは多くのタイプの機器で構成されている．これらの機器は，故障確率が時間に依存せず一定となる偶発故障系機器と，時間とともに増大する消耗故障系機器に大別できる．一般に，偶発故障系機器の故障過程に対しては，瞬間の故障確率密度を表すハザード率が時間に依存しない指数劣化ハザードモデル（あるいは，故障事象のポワソン到着モデル）によって定式化が可能である．これに対して，消耗故障系機器の場合には，ハザード率の時間依存性を考慮した非斉時型ハザードモデルが必要となる．しかし，実際には機器のタイプによって，ハザード率が同一であるとは限らず，むしろばらつきを持つと考えられる．したがって，多数のタイプの装置や機器で構成される情報システムの故障解析を実施する場合，異な

るタイプの機器間に存在するハザード率の異質性を考慮することが重要となる．本章では，このような問題意識の下に，ハザード率の異質性がガンマ分布に従うようなランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを定式化するとともに，情報システムを構成する多様な機器の故障確率を推計する方法論を提案する．

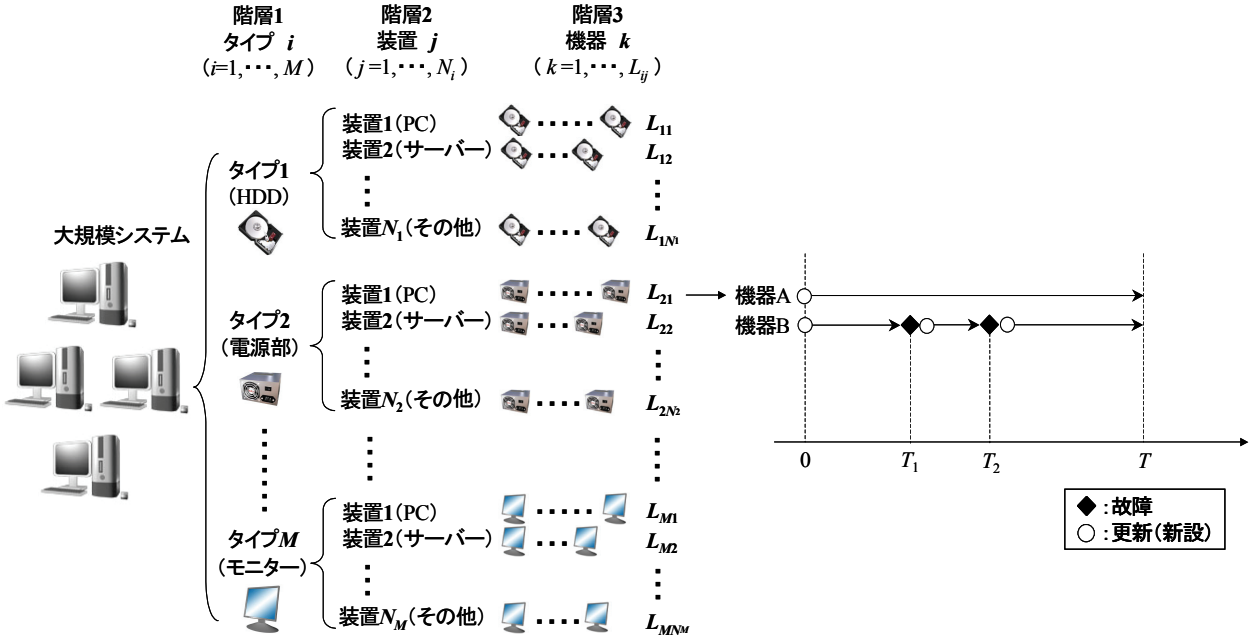
以上の問題意識の下に，本章では，消耗故障系機器の故障発生過程を表現するためのランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを提案し，実際の故障履歴データを用いて故障発生確率を推計する．以下，**3.2** で本章の基本的な考え方を説明する．**3.3** では，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを定式化し，モデルの推計方法について考察する．**3.4** では，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を示す．

3.2 本章の基本的な考え方

3.2.1 従来の研究概要

ハザードモデルは，信頼性解析の分野で施設や機械の寿命を予測するモデルとして開発され，信頼性解析のみならず多くの分野で適用事例が報告されている．また，ハザードモデルの推計方法に関しても研究成果が蓄積されており，その結果はいくつかの成書 [1]･[2] に詳しい．アセットマネジメントの分野でも，例えばShin and Madanat[3] は，道路舗装のひび割れ開始時刻を予測するためのワイブル劣化ハザードモデルを提案している．また，青木等 [4] はトンネル照明を対象として，ワイブル劣化ハザードモデルの有効性について実証的に検証している．さらに，劣化状態が複数の健全度で表現されるような施設の劣化予測を行うことを目的とした劣化ハザードモデルもいくつか提案されている．たとえば，津田等は劣化過程による健全度間の垂直的な推移関係を多段階指数ハザードモデルにより記述し，橋梁部材の劣化過程を記述するマルコフ推移確率を推計する方法を提案している [5]．また，劣化過程が使用時間という過去の履歴に依存するような多段階ワイブル劣化ハザードモデルが開発されている [6]．さらに，点検データの蓄積に応じて，劣化ハザードモデルをベイズ更新する方法論も提案されている [7]．

伝統的なハザード解析では，対象とするシステムがすべて同質の要素で構成されていると仮定し，あるハザード関数に従ってランダムに到着する故障事象をモデル化することを目的としている．ハザード解析では，ランダムな故障事象の発生過程をモデル化するが，その際にハザード関数という確定的モデルを用いる．しかし，本章の実証分析で対象とする情報システムのような大規模システムは，極めて多くの種類の機器で構成される複雑な構造を有している．大規模システムを運営・管理する上で，これらの数多くある個々の機器ごとの取替え戦略や備蓄方策を検討することが重要な課題となる．しかし，これらの機器の故障率が，すべて同一のハザード率で表現できるとは限らない．むしろ，機器の種類ごとのハザード率は，多様に異なると考えた方が自然であろう．このように機器の種類によるハザード率の異質性を表現する方法として，１）機器特性の相違をダミー変数で表現する方法，２）ハザード率の確率分布を考慮する方法が考えられる．前者の方法は，簡便で分かりやすいという利点がある．その一方で，機器の種類が増加す



注）大規模システムはM個のタイプの機器群で構成される．また，タイプi $(i = 1, \cdots, M)$の機器は，N_i個の装置に用いられる．さらに，装置j $(j = 1, \cdots, N_i)$には，タイプiのL_{ij}個の機器が用いられており，各機器を添え字k $(k = 1, \cdots, L_{ij})$で表す．故障履歴データベースには，各機器ごとに，初期時点から故障が発生した時刻に関する情報が記載されている．

図 3-1 故障事象の履歴データ

るにつれて，機器特性を表すダミー変数の数が増加し，モデルの推計結果の効率性が著しく低下するという問題がある．実際に，大規模情報システムは，同一種の機器であってもさらに用途や設置場所などの相違によって細分類することが可能であり，極めて少数・多品種のカテゴリーに属する機器で構成されている．このような多品種のカテゴリーに応じたダミー変数を用いてハザードモデルを推計することは実際的ではない．そこで，本章では後者の方法を採用し，機器の種類によるハザード率の異質性を確率分布で表現するようなランダム比例ハザードモデルを用いて，情報システムを構成する機器群の故障過程をモデル化する．

ハザード率の異質性を考慮したハザード解析に関しても，研究が蓄積されている．特に，個々のサンプルごとにハザード率の異質性が存在するような混合ハザードモデルに関しては膨大な研究の蓄積がある[8]−[13]．混合ハザードモデルでは，ハザード関数を支配する異質性パラメータが，ある確率密度関数に従って分布すると考える．その上で，混合ハザードモデルを，ハザード関数と異質パラメータの確率分布の確率的コンボリューションにより定義する．通常のポワソン過程では，稀少事象の発生率の平均と分散が同一の値をとるという限界がある．このためポワソン過程において，発生率の分散の表現方法の自由度

を増加させるために混合ポワソン過程モデルの研究が進展した[14]−[16]．また，貝戸等は路上障害物の到着過程を混合ポワソン過程としてモデル化するなど，アセットマネジメントへの適用事例[17]が現れている．これに対して，情報システムでは，モニター群，入出力機器群，ＣＰＵ等々，多数の同質な機器群により構成されている．換言すれば，同質なハザード率を有する機器のグループが存在し，各グループごとにハザード率が確率分布するという特徴を持っている．混合ハザードモデルを，このような特徴を有する情報システムの故障解析に対して用いることは不可能である．本章では，ハザード率のグループ間の異質性を考慮することが可能なランダム比例ハザードモデルを提案する．

3.2.2 大規模システムの劣化過程

交通管制システムのような大規模情報システムのアセットマネジメントを実施する場合，情報システムの構造的，機能的な複雑性を考慮した検討が不可欠である．**3.1** で言及したように，大規模情報システムのアセットマネジメントは，１）機器レベル，２）システムレベル，３）機能レベルという３つのレベルで構成される．このうち，本章では，機器レベルのアセットマネジメントを対象として，個々の機器の故障発生プロセスを解析するためのランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを提案する．本モデルを用いて，システムを構成する個々の機器の故障確率と，その時間的推移過程に関する情報を得ることができる．機器レベルでのアセットマネジメントでは，本モデルを用いて解析した故障率を用いて，交換機器の備蓄戦略や取替え戦略等を検討することが重要な課題となる．

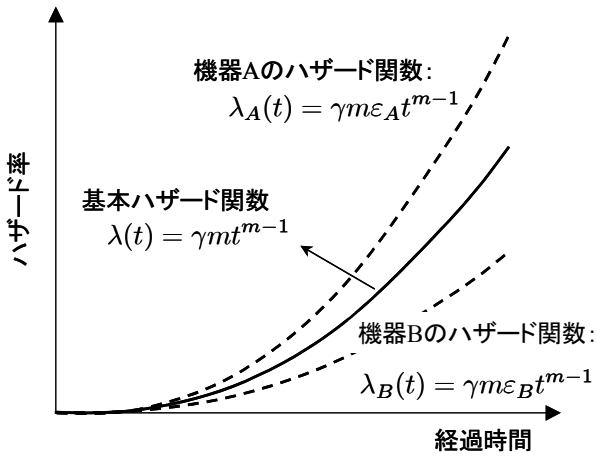
さらに，本章で分析した故障解析の成果は，機器レベルだけでなく，システムレベル，機能レベルにおけるアセットマネジメントを実施するための基本的な情報となる．機能レベルでのアセットマネジメントでは，サブシステム，機器群の故障確率を解析するとともに，それぞれの故障がシステム全体の機能障害に及ぼす影響の重大性に着目して，各サブシステム，機器群の保全戦略を検討することが求められる．そこでは，機器レベルで検討した故障解析モデルを用いて，サブシステムやシステム全体の故障発生過程を分析し，情報システムの信頼性を検討することが課題となる．その上で，システムの信頼性とライフサイクル費用の関係を分析し，システムの望ましい信頼性水準を検討することが求められる．最後に，システムレベルでは，情報システムの技術的陳腐化に関する検討が必要となる．情報システムを構成するハードウェア，ソフトウェアの技術革新の結果，情報システムの技術的陳腐化が急速に進展する可能性がある．技術的陳腐化が発生した場合，情報システムの一部，もしくはすべてが新しいシステムに取り替えられる．交通管制システムのような大規模情報システムでは，システムの更新には膨大な費用が発生する．したがって，情報システムを設計する場合，システムの物理的劣化，技術的陳腐化への対応策を検討するなど，システムの発展・更新オプションやライフサイクル費用を考慮した設計方法を開発することが必要となる．いずれのレベルにおいても，システムを維持するためのライフサイクル費用，システムの信頼性を解析することが重要な課題となるが，その際に本章で提案する劣化ハザードモデルは中心的な役割を果たすことになる．

3.2.3 モデル化の基本的フレーム

大規模情報システムの故障事象の発生過程をモデル化しよう．いま，情報システムを構成する機器群を，**図 3-1** に示すように，1）タイプ，2）装置，3）機器という 3 つの階層レベルに整理しよう.「タイプ」は，ハードディスク（以下，HDD と略す），電源部，処理部，モニター等，機器の種類が該当する．情報システムは M 種類のタイプの機器で構成されており，各機器のタイプを添え字 i $(i = 1, \cdots, M)$ で表す．さらに，タイプ i の機器は，N_i 個の「装置」で利用されており，装置の種類を添え字 j $(j = 1, \cdots, N_i)$ で表す．例えば本章の実証分析の対象とする交通管制システムの場合，各タイプの機器は，異なる部局においてパーソナルコンピュータ（PC と略す），サーバー等，異なった装置として利用されている．装置により,「機器」の利用方法が異なるため，故障の発生確率も異なる．さらに，装置 j には L_{ij} 個のタイプ i の機器 k $(k = 1, \cdots, L_{ij})$ が用いられている．各タイプ，各装置を構成する機器のハザード率は異質であると考える．しかし，各装置を構成する同種のタイプの機器の故障過程は，同質のハザード率を用いて表現できると考えよう．

いま，時刻 $t = 0$ から，無限遠に続く連続時間軸を導入する．大規模システムは，時刻 $t = 0$ に新規に導入され，それ以降の時間軸上で各機器の劣化が進展する．機器が故障すれば，直ちに新しい機器に交換される．交換される機器は，故障した機器と同様の故障特性を有すると仮定する．つぎに，時刻 $t = 0$ から，時間 T が経過した現在時刻 $t = T$ に着目しよう．この時，各機器に関して，**図 3-1** に示すような故障履歴が得られたと考えよう．図の例では，タイプ 2（電源部）で装置 1（PC）として使用されている機器（電源部）の故障履歴を例示している．タイプ 2 の機器は，N_2 個の装置で構成されている．このうち，装置 1 を構成する機器（電源部）A は，時刻 $t = 0$ から一度も故障していない．機器 A に関しては，観察された使用時間は T であり，当該機器の寿命は少なくとも使用時間 T より長いことが理解できる．一方，同図の機器 B の場合，時刻 T_1, T_2 において故障している．最初の故障時点までの寿命は $\zeta = T_1$ であり，2 回目の故障時点までの寿命は $\zeta = T_2 - T_1$ となる．

ここで，各タイプの機器が，消耗故障系の故障特性を有すると考えよう．消耗故障系機器では，**図 3-2** に示すように，直近の更新時点からの経過時間が長くなるほど，故障の発生確率（ハザード率）が大きくなる．このような消耗故障系機器の寿命分布が，ワイブル分布に従うと仮定しよう．さらに，異なるタイプの機器のハザード率が，時間の関数として**図 3-2** に示すように表現できると考える．このようなハザード率の時間的変化を表した関数をハザード関数と呼ぶ．各機器のハザード関数は，ある基準となるハザード関数に対して，互いに定数倍に拡大，もしくは縮小した関係にあると考えよう．このように互いに相似的な拡大・縮小関係にあるハザード関数群を表現するモデルを，比例ハザードモデルと呼ぶこととする．各装置を構成する各タイプの機器の故障過程が，互いに比例ハザードモデルで表現できる場合，ハザード率の異質性をハザード関数の比例定数の確率分布で表現することができる．情報システムは，数多くの装置



注）基本モデルは，$\varepsilon = 1$の場合に該当する．また，機器Aのハザード関数は基本モデルに対して$\varepsilon_A > 1$を乗じた関数となり，ハザード関数は上方へシフトする．一方，機器Bでは$\varepsilon_B < 1$であり，ハザード関数は下方へ比例的にシフトする．

図 3-2 ハザード関数の異質性

で構成されるが，各装置を構成する同一タイプの機器の数は，それほど多くない場合が少なくない．ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルは，基準となるワイブル劣化ハザード関数のパラメータと，タイプ間における比例定数の異質性分布を表す確率分布のパラメータを推計することにより，タイプ，装置間のハザード率の異質性を容易に表現できる．一方，ワイブル劣化ハザード率の異質性が比例ハザードモデルで表現できない場合，タイプ，装置ごとに異なるワイブル劣化ハザードモデルを推計することが必要となる．しかし，各装置を構成する同一タイプの機器数が少ない場合，ワイブル劣化ハザードモデルを推計することが困難となる．以上のことを考慮すれば，本章で提案するランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルは，少数・多品種の機器構成を有する情報システムの故障過程を表現するために，優れた性質を有している．しかし，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを用いるためには，タイプ間の故障率の異質性が，互いに比例的関係にあることが前提となる．比例的関係の有無に関する仮説検定に関しては，改めて**3.4.3**で言及する．

3.3 ランダム比例ハザードモデル

3.3.1 ワイブル劣化ハザードモデル

ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルは，タイプ，装置別機器間のハザード率の異質性を考慮したワイブル劣化ハザードモデルである．ハザードモデルに関する詳細は，参考文献1),2)に譲る．ここでは，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを定式化するに先立って，読者の便宜を図るために，ワイブル劣化ハザードモデルについて簡単に説明をしておく．

いま，ある機器が更新され，それが故障するまでの期間（以下，寿命と呼ぶ）に着目しよう．さらに，機器は連続して使用されており，故障の有無が常時観測されていると考えよう．機器の寿命を確率変数ζで表し，確率密度関数$f(\zeta)$，分布関数$F(\zeta)$に従って分布すると仮定する．ただし，寿命ζの定義域は$[0,\infty)$である．いま，初期時点から任意の時点$t \in [0,\infty)$まで，機器が故障しないで生存する確率（以下，生存確率と呼ぶ）$\tilde{F}(t)$は，全事象確率1から時点tまでに機器が故障する累積故障確率$F(t)$を差し引いた値

$$\tilde{F}(t) = 1 - F(t) \tag{3.1}$$

により定義できる．ここで，機器が時点tまで生存し，かつ期間$[t, t+\Delta t]$中にはじめて故障する確率は

$$\lambda(t)\Delta t = \frac{f(t)\Delta t}{\tilde{F}(t)} \tag{3.2}$$

と表せる．機器が時点tまで生存し，かつ当該時点で故障する確率密度$\lambda(t)$を「ハザード関数」と呼ぼう．式(3.1)の両辺をtに関して微分することにより，

$$\frac{d\tilde{F}(t)}{dt} = -f(t) \tag{3.3}$$

を得る．この時，式(3.2)は

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\tilde{F}(t)} = \frac{d}{dt}\left(-\log \tilde{F}(t)\right) \tag{3.4}$$

と変形できる．ここで，$\tilde{F}(0) = 1 - F(0) = 1$を考慮し，式(3.4)を積分すれば

$$\int_0^t \lambda(u)du = -\log \tilde{F}(t) \tag{3.5}$$

を得る．したがって，劣化ハザード関数$\lambda(u)$を用いれば，時点tまで機器が生存する確率$\tilde{F}(t)$は

$$\tilde{F}(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(u)du\right] \tag{3.6}$$

と表される．このように，劣化ハザード関数$\lambda(u)$の形式を決定すれば，機器の生存確率$\tilde{F}(t)$を導出することができる．さらに，$\tilde{F}(t) = 1 - F(t)$より，機器の累積故障確率$F(t)$を求めることができる．ここで，劣化ハザード関数としてワイブル劣化ハザード関数

$$\lambda(t) = \gamma m t^{m-1} \tag{3.7}$$

を考えよう．ただし，γは，到着密度を表すパラメータ，mは，時間を通じたハザード率の増加傾向を表す加速度パラメータである．ワイブル劣化ハザード関数を用いた場合，機器寿命の確率密度関数$f(t)$，および機器の生存確率$\tilde{F}(t)$は，それぞれ

$$f(t) = \gamma m t^{m-1} \exp(-\gamma t^m) \tag{3.8a}$$

$$\tilde{F}(t) = \exp(-\gamma t^m) \tag{3.8b}$$

と表される．

3.3.2 ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデル

いま，大規模システムが**図 3-1** に示したように，M種類のタイプの機器で構成されており，$i\,(i=1,\cdots,M)$番目の機器が，合計N_i個の装置に用いられている．さらに，装置jに合計L_{ij}個のタイプiの機器が用いられていると考えよう．いま，タイプiの機器のうち，装置j $(j=1,\cdots,N_i)$を構成するk $(k=1,\cdots,L_{ij})$番目の機器に着目しよう．当該機器が更新されてからの経過時間をt_{ij}^{k}と表す．各機器の故障事象の到着率がランダム比例ワイブル劣化ハザード関数

$$\lambda_{ij}(t_{ij}^{k})=\gamma_i m\varepsilon_{ij}(t_{ij}^{k})^{m-1} \tag{3.9}$$

に従うと考えよう．式(3.9)は，ワイブル劣化ハザード関数(3.7)に，タイプi，装置jのハザード率の異質性[14]·[16]を表すパラメータ（以下，異質性パラメータと呼ぶ）ε_{ij}が付加されている．異質性パラメータは，タイプ別，装置別の機器の間におけるハザード率の異質性を表している．特に，$\varepsilon_{ij}=1$となる場合，ランダム比例ワイブル劣化ハザード関数(3.9)は，通常のワイブル劣化ハザード関数に一致する．このようなハザード関数を，基本ハザード関数（**図 3-2** 参照）と呼ぶ．しかし，同一の装置に含まれる同一の機器に対しては，異質性パラメータは共通の値をとると考ええる．異質性パラメータは，現実には確定的な値をとるが，観測者にとって観測不可能なパラメータである．また，タイプi，装置jの機器kの寿命の確率密度関数$f_{ij}(t_{ij}^{k})$，および生存確率$\tilde{F}_{ij}(t_{ij}^{k})$は，それぞれ

$$f_{ij}(t_{ij}^{k})=\gamma_i m\varepsilon_{ij}(t_{ij}^{k})^{m-1}\exp\left\{-\gamma\varepsilon_{ij}(t_{ij}^{k})^{m}\right\} \tag{3.10a}$$

$$\tilde{F}_{ij}(t_{ij}^{k})=\exp\left\{-\gamma_i\varepsilon_{ij}(t_{ij}^{k})^{m}\right\} \tag{3.10b}$$

と表される．

いま，異質性パラメータの値が，ある確率分布に従って分布する確率変数であると考えよう．ワイブル劣化ハザードモデル(3.9)は，すべてのタイプの機器に対して同一の劣化加速度パラメータmを持つが，タイプ，装置ごとにハザード到着密度$\gamma_i m\varepsilon_{ij}$が比例的に異なるような劣化特性を表現している．加速度パラメータの同質性（以下，比例性と呼ぶ）の仮説検定に関しては，改めて **3.4.3** で検討する．本章では，対象とする機器ごとに，ハザード到着密度が確率分布するようなワイブル劣化ハザードモデルを，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルと呼ぶこととする．この時，異質性パラメータの確率分布の考え方によって，異なったランダム比例ワイブルハザードモデルを定式化することができる．すなわち，**表 3-1** に示すように，1）機器のタイプにより，異質性パラメータの確率分布の平均が異なる場合（モデル１），2）機器のタイプiに関わらず，異質性パラメータが同一の確率分布に従う場合（モデル２）という２通りの表現が可能である．

ここで，異質性パラメータε_{ij}の確率分布がガンマ分布に従うと考えよう．さらに，モデル１を想定し，

表 3-1 異質性パラメータの確率分布

モデル	平均	分散
1	$\gamma_1 \neq \cdots \neq \gamma_M$	ϕ^{-1}
2	$\gamma_1 = \cdots = \gamma_M$	ϕ^{-1}

注）γ_iはタイプiの機器の異質性パラメータの確率分布の平均を，ϕ^{-1}は標準ガンマ分布(3.12)の分散を表す.

異質性パラメータがタイプごとに異なる平均を持つ場合を考えよう．ガンマ分布は，その特殊型として指数分布を含んでおり，区間$[0,\infty)$で定義される指数族確率密度関数を表現できるという利点がある．ここで，パラメータγ_iがタイプiの機器のハザード到着密度の平均を表すと考え，異質性パラメータε_{ij}が，平均１，分散ϕ^{-1}のガンマ分布に従う確率誤差項であると考えよう．ガンマ分布が区間$[0,\infty)$で定義されており，任意の説明変数と確率誤差項に関して式(3.9)の右辺が正の値をとることが保証される．一般に，ガンマ分布$G(\alpha,\beta)$の確率密度関数$g(\varepsilon_{ij}:\alpha,\beta)$は

$$g(\varepsilon_{ij}:\alpha,\beta)=\frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}\varepsilon_{ij}^{\alpha-1}\exp\left(-\frac{\varepsilon_{ij}}{\beta}\right) \tag{3.11}$$

と定義できる．ガンマ分布$G(\alpha,\beta)$の平均は$\mu=\alpha\beta$で，分散は$\sigma^2=\alpha\beta^2$である．また，$\Gamma(\cdot)$はガンマ関数である．さらに，平均１，分散$1/\phi$のガンマ分布の確率密度関数$\bar{g}(\varepsilon_{ij}:\phi)$は

$$\bar{g}(\varepsilon_{ij}:\phi)=\frac{\phi^{\phi}}{\Gamma(\phi)}\varepsilon_{ij}^{\phi-1}\exp(-\phi\varepsilon_{ij}) \tag{3.12}$$

と表される．異質性パラメータの確率分布を，標準ガンマ分布で表現する場合，上述の２つのモデルの違いを**表 3-1**に示すように整理できる．

3.3.3 モデルの推計法

一般性を損なうことなく，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルとしてモデル１をとりあげる．モデル２は，モデル１において，**表 3-1**に示すような条件を付加して，モデル１を簡略化した場合に他ならない．ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデル（モデル１）には，タイプごとに異なる到着密度パラメータγ_i $(i=1,\cdots,M)$，加速度パラメータm，タイプ，装置ごとに異なる異質性パラメータε_{ij} $(i=1,\cdots,M;j=1,\cdots,N_i)$，および異質性パラメータの分散パラメータ$\phi$という未知パラメータが存在する．通常のワイブル劣化ハザードモデルの場合には，故障の履歴データから，パラメータγ_iとmを推計すればいい．しかし，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルの場合，これら２種類のパラメータ以外にも，異質性パラメータの分散パラメータϕと，タイプ，装置ごとの異質性パラメータε_{ij} $(i=1,\cdots,M;j=1,\cdots,N_i)$を求めることが必要となる．

いま，対象とするシステムの故障履歴に関するデータベースが入手可能であると考えよう．データベースには，対象とするシステムが導入された時刻以降，すべての機器が故障した（交換された）時刻

に関する情報が記載されている．いま，機器の故障履歴を$\boldsymbol{\Xi} = (\boldsymbol{\xi}_1, \cdots, \boldsymbol{\xi}_M)$と表そう，ここに，$\boldsymbol{\xi}_i = (\boldsymbol{\xi}_{i1}, \cdots, \boldsymbol{\xi}_{iN_i})$はタイプ$i$の機器の故障履歴である．また，$\boldsymbol{\xi}_{ij}$は，装置$j$のタイプ$i$の機器の故障履歴であり，$\boldsymbol{\xi}_{ij} = \left\{(\delta_{ij}^1, t_{ij}^1), \cdots, (\delta_{ij}^{L_{ij}}, t_{ij}^{L_{ij}})\right\}$ $(i = 1, \cdots, M; j = 1, \cdots, N_i)$である，また，$\delta_{ij}^k$はタイプ$i$の装置$j$の機器$k$ $(k = 1, \cdots, L_{ij})$が故障した場合に値1を，故障していない場合に値0をとるダミー変数である，t_{ij}^kは，タイプi，装置jの機器kの使用時間（もしくは，寿命）である．すなわち，$\delta_{ij}^k = 0$の時，t_{ij}^kは前回の更新期から当該時刻までの期間長を意味する．一方，$\delta_{ij}^k = 1$の時，t_{ij}^kは寿命を表す．ここで，異質性パラメータ$\bar{\varepsilon}_{ij}$を与件と考えよう．タイプi，装置jの機器故障に関するデータ$\boldsymbol{\xi}_{ij}$が観測される条件付き尤度$\ell_{ij}(\boldsymbol{\xi}_{ij} : \gamma_i, m, \bar{\varepsilon}_{ij})$は，

$$\begin{aligned}\ell_{ij}(\boldsymbol{\xi}_{ij} : \gamma_i, m, \bar{\varepsilon}_{ij}) = \prod_{k=1}^{L_{ij}} \{\tilde{F}_{ij}(t_{ij}^k : \gamma_i, m, \bar{\varepsilon}_{ij})\}^{(1-\delta_{ij}^k)} \\ \{f_{ij}(t_{ij}^k : \gamma_i, m, \bar{\varepsilon}_{ij})\}^{\delta_{ij}^k}\end{aligned} \tag{3.13}$$

で表される．ただし，上式において，寿命分布の確率密度関数$f_{ij}(t_{ij}^k : \gamma_i, m, \bar{\varepsilon}_{ij})$，生存関数$\tilde{F}_{ij}(t_{ij}^k : \gamma_i, m, \bar{\varepsilon}_{ij})$は，パラメータ$\gamma_i, m, \bar{\varepsilon}_{ij}$の関数として表現されることを明示的に示している．ここで，異質性パラメータε_{ij}が標準ガンマ分布$\bar{g}(\varepsilon_{ij} : \phi)$に従って分布する場合，観測データ$\boldsymbol{\xi}_{ij}$が観測される尤度関数は

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{ij}(\boldsymbol{\xi}_{ij} : \boldsymbol{\theta}_i) &= \int_0^\infty \prod_{k=1}^{L_{ij}} \{\tilde{F}_{ij}(t_{ij}^k : \gamma_i, m, \varepsilon_{ij})\}^{(1-\delta_{ij}^k)} \\ &\quad \{f_{ij}(t_{ij}^k : \gamma_i, m, \varepsilon_{ij})\}^{\delta_{ij}^k} \bar{g}(\varepsilon_{ij} : \phi) d\varepsilon_{ij} \\ &= \frac{\phi^\phi}{\Gamma(\phi)} \prod_{k=1}^{L_{ij}} \{\gamma_i m (t_{ij}^k)^{m-1}\}^{\delta_{ij}^k} \\ &\quad \int_0^\infty \varepsilon_{ij}^{s_{ij}+\phi-1} \exp\{-(\phi + \gamma_i \tau_{ij})\varepsilon_{ij}\} d\varepsilon_{ij} \\ &\quad (i = 1, \cdots, M)\end{aligned} \tag{3.14}$$

と表される．ただし，$\boldsymbol{\theta}_i = (\gamma_i, m, \phi)$である．また，$s_{ij} = \sum_{k=1}^{L_{ij}} \delta_{ij}^k$，$\tau_{ij} = \sum_{k=1}^{L_{ij}} (t_{ij}^k)^{m-1}$である．上式において，タイプ$i$，装置$j$のすべての機器に対して，異質パラメータ$\varepsilon_{ij}$が共通の値をとる．このことを表現するために，尤度関数$\mathcal{L}_i(\boldsymbol{\xi}_i : \boldsymbol{\theta}_i)$を，条件付き尤度$\ell_{ij}(\boldsymbol{\xi}_{ij} : \gamma_i, m, \varepsilon_{ij})$の確率変数$\varepsilon_{ij}$に関する期待値として定義していることに留意して欲しい．ここで，変数変換$x_{ij} = \varepsilon_{ij}(\phi + \gamma_i \tau_{ij})$を施せば，

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{ij}(\boldsymbol{\xi}_{ij} : \boldsymbol{\theta}_i) &= \frac{\phi^\phi}{\Gamma(\phi)} \prod_{k=1}^{L_{ij}} \left\{\gamma_i m (t_{ij}^k)^{m-1}\right\}^{\delta_{ij}^k} \\ &\int_0^\infty \left(\frac{x_{ij}}{\phi + \gamma_i \tau_{ij}}\right)^{s_{ij}+\phi-1} \exp(-x_{ij}) \frac{dx_{ij}}{\phi + \gamma_i \tau_{ij}} \\ &= \frac{\phi^\phi}{\Gamma(\phi)} \frac{\Gamma(s_{ij} + \phi)}{(\phi + \gamma_i \tau_{ij})^{s_{ij}+\phi}} \prod_{k=1}^{L_{ij}} \left\{\gamma_i m (t_{ij}^k)^{m-1}\right\}^{\delta_{ij}^k}\end{aligned} \tag{3.15}$$

を得る．したがって，観測データ$\boldsymbol{\Xi}=(\boldsymbol{\xi}_1,\cdots,\boldsymbol{\xi}_M)$が観測される対数尤度関数は

$$\begin{aligned}\ln\mathcal{L}(\boldsymbol{\Xi},\boldsymbol{\theta}) &= \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}\ln\mathcal{L}_{ij}(\boldsymbol{\xi}_{ij}:\boldsymbol{\theta}_i)\\ &= N\phi\ln\phi-\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}(s_{ij}+\phi)\ln(\phi+\gamma_i\tau_{ij})\\ &+\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}\sum_{k=0}^{s_{ij}-1}\ln(\phi+k)+\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}\sum_{k=1}^{L_{ij}}\delta_{ij}^{k}\Big\{\ln\gamma_i\\ &+\ln m+(m-1)\ln t_{ij}^{k}\Big\}\end{aligned}\tag{3.16}$$

と表される．ただし，$\boldsymbol{\theta}=(\theta_1,\cdots,\theta_{M+2})$の各要素は$(\theta_1,\cdots,\theta_M)=(\gamma_1,\cdots,\gamma_M),\theta_{M+1}=m,\theta_{M+2}=\phi$と表される．また，$N=\sum_{i=1}^{M}N_i$であり，式(3.16)の右辺第３項において，$s_{ij}=0$が成立する場合，$\sum_{k=0}^{s_{ij}-1}\ln(\phi+k)=0$と定義する．また，$s_{ij}=1$の時は，$\sum_{k=0}^{s_{ij}-1}\ln(\phi+k)=\ln\phi$である．さらに，モデル２を用いた場合の対数尤度関数は，

$$\begin{aligned}\ln\mathcal{L}(\boldsymbol{\Xi},\boldsymbol{\theta}) &= N\phi\ln\phi-\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}(s_{ij}+\phi)\ln(\phi+\gamma\tau_{ij})\\ &+\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}\sum_{k=0}^{s_{ij}-1}\ln(\phi+k)+\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_i}\sum_{k=1}^{L_{ij}}\delta_{ij}^{k}\Big\{\ln\gamma\\ &+\ln m+(m-1)\ln t_{ij}^{k}\Big\}\end{aligned}\tag{3.17}$$

と表される．

対数尤度関数(3.16)を最大にするようなパラメータ値$\boldsymbol{\theta}$の最尤推定量は

$$\frac{\partial\ln\mathcal{L}(\hat{\boldsymbol{\theta}},\boldsymbol{\Xi})}{\partial\theta_i}=0,\ (i=1,\cdots,M+2)\tag{3.18}$$

を同時に満足するような$\hat{\boldsymbol{\theta}}=(\hat{\theta}_1,\cdots,\hat{\theta}_{M+2})$として与えられる．さらに，パラメータの漸近的な共分散行列の推定量$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}(\hat{\boldsymbol{\theta}})$は，

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}(\hat{\boldsymbol{\theta}})=\left[\frac{\partial^2\ln\mathcal{L}(\hat{\boldsymbol{\theta}},\boldsymbol{\Xi})}{\partial\boldsymbol{\theta}\partial\boldsymbol{\theta}'}\right]^{-1}\tag{3.19}$$

と表すことができる[18]･[19]．ただし，上式の右辺の逆行列は$\partial^2\ln\mathcal{L}(\hat{\boldsymbol{\theta}},\boldsymbol{\Xi})/\partial\theta_i\partial\theta_j$を要素とする$(M+2)\times(M+2)$次のFisher情報行列[19]の逆行列である．パラメータの最尤推定量は，M+2次元の非線形連立方程式(3.18)を解くことにより得られる．本章では，ニュートン・ラフソン法により最尤推定量を求めることとした．最尤推定量$\hat{\boldsymbol{\theta}}$を求めれば，共分散行列の推定量$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}(\hat{\boldsymbol{\theta}})$を用いて$t-$検定統計量を推定できる．

つぎに，パラメータベクトルの最尤推定量$\hat{\boldsymbol{\theta}}$を与件として，異質性パラメータ$\varepsilon_{ij}$ $(i=1,\cdots,M;j=1,\cdots,N_i)$の最尤推計値を求めよう．ここで，部分尤度関数を

$$\mathcal{L}_{ij}^{\circ}(\boldsymbol{\xi}_{ij},\varepsilon_{ij}:\hat{\boldsymbol{\theta}}_i)=\frac{\hat{\phi}^{\hat{\phi}}}{\Gamma(\hat{\phi})}\prod_{k=1}^{L_{ij}}\left\{\hat{\gamma}_i\hat{m}(t_{ij}^{k})^{\hat{m}-1}\right\}^{\delta_{ij}^{k}}$$

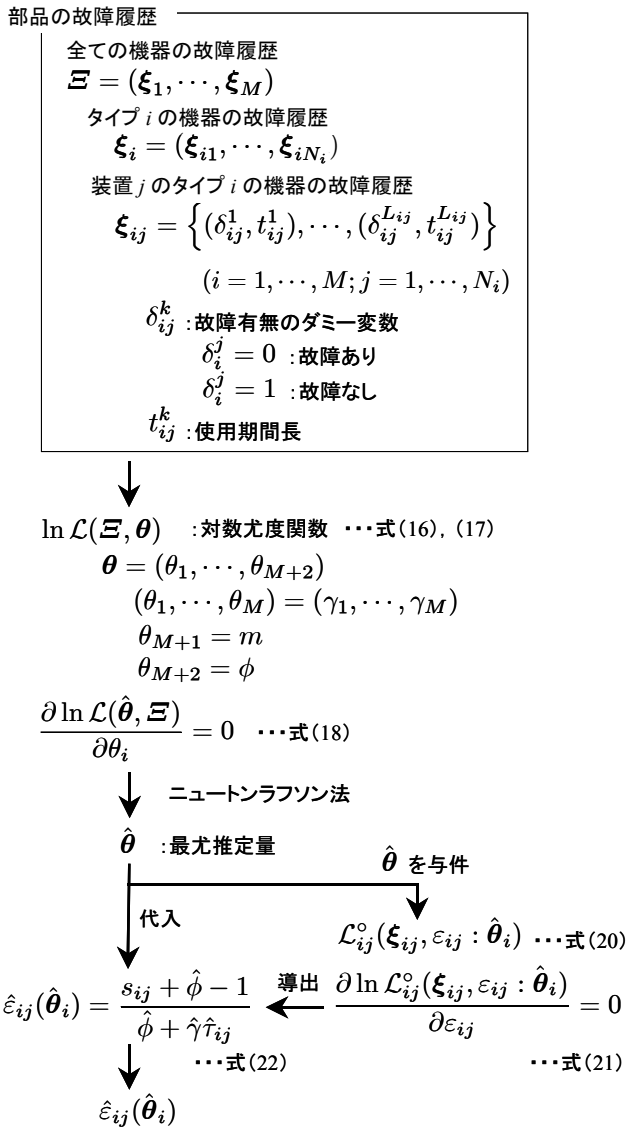


図 3-3 最尤推定量の推定フロー

$$\varepsilon_{ij}^{s_{ij}+\hat{\phi}-1} \exp\left\{-(\hat{\phi} + \hat{\gamma}_i \hat{\tau}_{ij})\varepsilon_{ij}\right\} \tag{3.20}$$

と定義しよう．ただし，$\hat{\tau}_{ij} = \sum_{k=1}^{L_{ij}} (t_{ij}^k)^{\hat{m}}$である．この時，異質性パラメータ$\varepsilon_{ij}$の最尤推定量は

$$\frac{\partial \ln \mathcal{L}_{ij}^{\circ}(\boldsymbol{\xi}_{ij}, \varepsilon_{ij} : \hat{\boldsymbol{\theta}}_i)}{\partial \varepsilon_{ij}} = 0 \tag{3.21}$$

を満足するような$\hat{\varepsilon}_{ij}$として求めることができる．このようにして求めた異質性パラメータの最尤推定量は，パラメータ$\hat{\boldsymbol{\theta}}_i = (\hat{\gamma}_i, \hat{m}, \hat{\phi})$を与件として求めた推定量である．このことを明示的に表現するために，式(3.21)の解を，$\hat{\varepsilon}_{ij}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i)$と表そう．式(3.20),(3.21)より，具体的に$\hat{\varepsilon}_{ij}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i)$を求めれば次式を得る．

$$\hat{\varepsilon}_{ij}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i) = \frac{s_{ij} + \hat{\phi} - 1}{\hat{\phi} + \hat{\gamma}\hat{\tau}_{ij}} \tag{3.22}$$

なお，読者の便宜を図るために，以上の最尤推定量の推定フローを**図 3-3** に示す．併せて参照されたい．

3.4 適用事例

3.4.1 適用事例の概要

中日本高速道路株式会社横浜支社が管理する交通管制システムを対象として，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルの推計を試みる．同支社の交通管制システムは，旧システムを1990年から順次更新したシステムであり，それ以降継続的に稼動している．交通管制システムは，９つの中央局システム（以下，部局と呼ぶ）で構成され，高速道路の運行状況を管理し，利用者に対して適切な情報をリアルタイムで提供している．交通管制システムの作動状況もリアルタイムで監視されており，故障が発生した場合には，故障発生機器が特定され，故障時刻，故障内容が記録されることになる．

本章では，交通管制システムを構成する機器の中で，それが故障すればシステム全体の重大な機能障害に発展する可能性のあるような機器群を対象として，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを推計する．交通管制システムの故障履歴データベースの調査，システム管理者へのヒアリングにより，モデル推計の対象とする機器群を選定した．その結果，最終的に機器のタイプとしてHDD（ハードディスク），電源部，処理部の３つを取り上げることとした．現行の交通管制システムにおいて，HDDは202台，電源部は306台，処理部は185台設置されている．一方，同様の調査とヒアリングを通して，これらの機器のうち，HDDと処理部は，９つの部局において，PC（モニター，端末部で使用），サーバー（サーバー，処理装置として使用），その他装置（前述した用途以外で使用）の３種類の用途で利用されることもわかった．各用途に用いられる各タイプの機器数を**表 3-2** に整理している．**図 3-1**，あるいは **3.3.3** で述べたように，現行システムに更新して以来，一度も故障が発生していない機器については，使用開始から現時点までの使用期間長に関するサンプルが獲得できる．言い換えれば，当該機器の寿命に関するデータは入手できない．一方，過去に故障が発生した機器については，使用開始から故障時点までに稼動した機器に関しては寿命に関するサンプルが入手できる．当該機器が修理・更新により再度使用開始になった時点から新たなサンプルとして数える．したがって，機器１台に対して得られるサンプル数は，(故障回数＋１）個である．また，交通管制システムの故障履歴データベースの中には，機器の更新により現在では使用されていないタイプの機器も含まれている．しかし，交通管制システムの現状の運営・管理，あるいは今後の取替え戦略や備蓄方策を考える上では，それらの機器に関する情報は不要であるので，サンプルから除外することとした．さらに，交通管制システムは数多くの機器を有するために，初期不良により使用開始から故障時点までの期間が非常に短い機器がごく稀に存在する．今回の推計に当たり，初期不良と考えられるサンプルについても同様の理由から特異情報として除外することとした．初期不良サンプルは，使用開始から12ヶ月以内に故障が発生したサンプルである．

表 3-2 タイプ・装置別サンプル数

	HDD	電源部	処理部本体
PC	72	306	55
サーバー	111	-	57
その他	19	-	73
合計	202	306	185

注）電源部にはPC，サーバー，その他の用途別の分類はないため，一括してPC部に記入している．数字は各機器の台数である．その他は，PC，サーバー以外の用途に利用される装置を意味する．

3.4.2 推計結果

本章の適用事例では，HDD，電源部，処理部という３つのタイプの機器をとりあげる．したがって，モデル１においては３つの到着密度パラメータγ_i $(i = 1, 2, 3)$を導入する．また，９つの部局に設置されているPC，サーバー，その他の装置によりハザード率に異質性があると考え，装置別に異質性パラメータε_{ij} $(i = 1, 2, 3; j = 1, \cdots, N_i)$を定義する．したがって，推計すべき未知パラメータは，１）モデル１の場合，到着密度パラメータγ_i $(i = 1, 2, 3)$，加速度パラメータm，異質性分散パラメータϕ，ε_{ij}となる．２）モデル２の場合，γ，m，ϕ，ε_{ij}である．**3.3.3**で提案した方法により推計したランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを**表 3-3**に示している．ここでは，異質パラメータの確率分布として２つのモデルを採用した結果を比較している．括弧の中の数値はt−値を表しており，いずれのパラメータに関するt−値も，各説明変数のモデルに対する説明力がないという帰無仮説は有意水準0.95で棄却される結果となっている．機器のタイプごとに異質性パラメータの平均を設定したモデル１の方が，モデル２よりも対数尤度が大きい値を示している．さらに，モデル１を用いることにより，機器のタイプによるハザード率の違いをより明示的に表現することが可能である．したがって，以下では，モデル１の推計結果を用いて，分析を進めることとする．**表 3-3**に示したように，モデル１の加速度パラメータの最尤推計量は$\hat{m} = 2.174$となっている．式(3.10b)より，実際に，各タイプの機器の生存確率が使用期間の増加に伴って加速度的に減少していくことがわかる．一般的に$\hat{m} = 1.00$であれば故障確率が時間に依存しない偶発故障系と考えられるが，本章でとりあげた機器は，すべて消耗故障系の故障特性を有している．

3.4.3 比例性仮説の検定

ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルは，すべてのタイプの機器が同一の加速度パラメータ$\hat{m}$を有するという比例性仮説を前提としている．しかし，機器のタイプによっては，他の機器群と同一の加速度パラメータを有しているとは考えにくい場合も存在する．このような場合，機器のタイプを同一の加速度パラメータを持つようなグループに分割し，それぞれのグループごとにランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを推計することが必要となる．ここで，まず各タイプの機器の故障過程に，比例性仮説が成立す

表 3-3 モデルの推計結果

パラメータ		モデル 1	モデル 2
γ	γ_1	1.251E-5 (-5.104E6)	5.834E-6 (-1.800E6)
	γ_2	1.631E-6 (-2.311E7)	
	γ_3	5.293E-6 (-9.182E6)	
m		2.174 (49.031)	2.216 (8.768)
ϕ		1.193 (2.182)	0.632 (2.801)
対数尤度		-402.441	-407.405

注）括弧の中はt-値を示している．モデル 2 では異質パラメータの平均が機器のタイプによらず同一の値をとる．

るか否かを仮説検定する方法について考察する．ここでは，今後の適用可能性を考慮して，一般的な場合を想定して仮説検定の方法を記述しよう．

いま，タイプ i $(i = 1, \cdots, M)$ の比例性仮説を検討するための仮説検定モデルを

$$\begin{cases} H_i^0 : m = \hat{m} & \text{and} \quad \hat{\gamma}_i, \hat{\phi} \\ H_i^1 : m \neq \hat{m} & \text{and} \quad \hat{\gamma}_i, \hat{\phi} \end{cases} \tag{3.23}$$

と定式化する．ここで，パラメータ $\boldsymbol{\theta}_i$ の最尤推計値を $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i^0 = (\hat{\gamma}_i, \hat{m}, \hat{\phi})$ と表そう．最尤推計量 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i^0$ を与件とした機器タイプ i の部分尤度関数を

$$\mathcal{L}_i(\boldsymbol{\xi}_i : \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^0) = \frac{\hat{\phi}^{\hat{\phi}}}{\Gamma(\hat{\phi})} \frac{\Gamma(s_{ij} + \hat{\phi})}{(\hat{\phi} + \hat{\gamma}_i \hat{\tau}_{ij})^{s_{ij} + \hat{\phi}}} \prod_{k=1}^{L_{ij}} \{\hat{\gamma}_i \hat{m} (t_{ij}^j)^{\hat{m}-1}\}^{\delta_{ij}^k} \tag{3.24}$$

と定義する．つぎに，パラメータ $\hat{\gamma}_i, \hat{\phi}$ を与件とした部分尤度関数 (3.24) の最大値を

$$\mathcal{L}_i(\boldsymbol{\xi}_i : \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i) = \max_m \left\{ \frac{\hat{\phi}^{\hat{\phi}}}{(\hat{\phi} + \hat{\gamma}_i \hat{\tau}_{ij})^{s_{ij} + \hat{\phi}}} \frac{\Gamma(s_{ij} + \hat{\phi})}{\Gamma(\hat{\phi})} \prod_{k=1}^{L_{ij}} \{\hat{\gamma}_i m (t_{ij}^k)^{m-1}\}^{\delta_{ij}^k} \right\} \tag{3.25}$$

と表そう．この時，仮説検定モデル (3.23) を検定するための尤度比検定統計量は

$$\mathcal{LR}_i = 2\{ \ln[\mathcal{L}_i(\boldsymbol{\xi}_i : \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i)] - \ln[\mathcal{L}_i(\boldsymbol{\xi}_i : \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^0)] \} \tag{3.26}$$

と表せる．ここに，$\ln[\mathcal{L}_i(\boldsymbol{\xi}_i : \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i)]$ は帰無仮説 H_i^0 の制約がない場合の部分尤度を，$\ln[\mathcal{L}_i(\boldsymbol{\xi}_i : \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^0)]$ は帰無仮説 H_i^0 の制約下での部分尤度を表す．また，$\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i$ は制約がない場合の最尤推計量を表す．帰無仮説 H_i^0 によって制約を受けるパラメータ数は 1 個であるために，尤度比検定統計量の自由度は 1 となる．したがって，検

表 3-4 尤度比検定統計量

	$\mathcal{LR}_i$
HDD($i=1$)	2.9237E-2
電源部 ($i=2$)	7.9481E-2
処理部 ($i=3$)	1.7850E-5

定統計量$\mathcal{LR}_i$が棄却域$\mathcal{LR}_i \geq \chi^2_{(100-\alpha)}(1)$を満足する場合，有意水準$\alpha$%で帰無仮説$H_0^i$を棄却できることになる．ただし，$\chi^2(1)$は自由度1の$\chi^2$分布に従う確率変数であり，$\chi^2_{(100-\alpha)}(1)$は有意水準$\alpha$%と対応する臨界値である．すなわち，$\mathrm{Prob}\{\chi^2(1) \geq \chi^2_{(100-\alpha)}(1)\} = 0.01 \times (100-\alpha)$が成立する．比例性仮説検定モデルを用いて，すべてのタイプの機器の故障過程を，単一のランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを用いて表現できるかどうかを検討しよう．比例性仮説が棄却される場合，機器のタイプを複数個のグループに分割するとともに，各グループごとにランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを推計することが必要となる．このような比例性仮説の検定と，それに基づく機器のタイプのグルーピングの手順を以下のように整理できる．

ステップ1 すべてのタイプの機器をプールしたデータベース（原データベースと呼ぶ）を対象としてランダム比例ハザードモデルを推計する．

ステップ2 機器のタイプごとに尤度比検定により比例性仮説を検定する．比例性仮説が棄却されたタイプの機器をプールした派生データベースを作成する．原データベースから，派生データベースに属するサンプルを除去し，縮小したデータベースを原データベースとする．

ステップ3 原データベース，および派生データベースに基づいてランダム劣化ワイブルハザードモデルを推計する．

ステップ4 派生データベースに基づいて推計したランダム劣化ワイブルハザードモデルに関して，データベースに含まれる機器群を対象として比例性仮説を検定する．必要であれば，第2次派生データベースを作成する．比例性仮説が棄却される場合，派生データベースの分割を続ける．比例性仮説を棄却できない場合，ステップ5へ進む．

ステップ5 タイプ，装置別の異質性パラメータの最尤推計値$\hat{\varepsilon}_{ij}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i)$を式(3.22)を用いて推計する．

本適用事例の場合，3つのタイプの機器を対象としている．異質パラメータの確率分布としてモデル1を取り上げた場合，尤度比検定統計量$\mathcal{LR}_i(i=1,2,3)$は**表 3-4**に示すようになる．ここで，有意水準$\alpha = 95\%$とした場合，$\chi^2_{(100-\alpha)}(1) = 3.84$であるので，すべてのタイプが同一の加速度パラメータ$\hat{m}$を有するという帰無仮説H_i^0は棄却されない．したがって，以下では3つのタイプの機器に対して，同一の加速度パラメータを用いることとする．

表 3-5 異質性パラメータ

		HDD	電源部	処理部本体
部局１	（ＰＣ）	0.154 (1)	0.006 (5)	0.154(1)
	（サーバー）	0.148 (1)	-	0.148 (1)
	（その他）	-	-	0.008 (2)
部局２	（ＰＣ）	0.123 (9)	0.120 (96)	0.770 (10)
	（サーバー）	2.208 (17)	-	0.125 (7)
	（その他）	0.161 (1)	-	0.008 (13)
部局３	（ＰＣ）	0.146 (3)	0.007 (81)	0.146 (3)
	（サーバー）	0.669 (23)	-	0.008 (15)
	（その他）	0.133 (2)	-	0.860 (15)
部局４	（ＰＣ）	1.437 (12)	0.004 (27)	0.688 (5)
	（サーバー）	0.768 (22)	-	0.674 (7)
	（その他）	0.006 (16)	-	0.833 (16)
部局５	（ＰＣ）	0.753 (5)	0.008 (12)	0.113 (4)
	（サーバー）	0.600 (15)	-	0.628 (9)
	（その他）	-	-	-
部局６	（ＰＣ）	0.134 (4)	0.008 (17)	0.132 (4)
	（サーバー）	0.114 (8)	-	0.802 (6)
	（その他）	-	-	0.142 (2)
部局７	（ＰＣ）	0.147 (2)	0.007 (7)	0.147 (2)
	（サーバー）	1.304 (9)	-	0.136 (2)
	（その他）	-	-	0.009 (4)
部局８	（ＰＣ）	5.400 (32)	1.360(51)	0.481 (23)
	（サーバー）	1.833 (13)	-	1.508 (7)
	（その他）	-	-	0.581 (16)
部局９	（ＰＣ）	0.844 (4)	0.632 (10)	0.416 (3)
	（サーバー）	0.138 (3)	-	0.948 (3)
	（その他）	-	-	0.123 (5)

注）ーは，該当する部局に装置が存在しないことを示す．また，電源部にはPC，サーバー，装置の用途別の分類はないため，一括してPC部に記入している．() 内の数字は各機器の台数である．

3.4.4 分析結果

3.4.2 では，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを用いて，各タイプの機器の到着密度パラメータ γ_i $(1,2,3)$，加速度パラメータ m，及び，異質性分散パラメータϕの最尤推計量を求めた．ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルでは，すべてのタイプの機器が同一の加速度パラメータ$\hat{m}$を有するという比例性仮説を前提としている．この前提の下で，各タイプの機器のワイブル劣化ハザード関数の異質性は，γ_i，ϕと異質性パラメータ値$\varepsilon_{ij}(i=1,2,3;j=1,\cdots,27)$で表現できる．また，**3.4.3** では，すべてのタイプの機器が同一の加速度パラメータ$\hat{m}$を有するという比例性仮説を検定した．その結果，仮説検定モデル(3.23)における帰無仮説 H_i^0が棄却できないことを確認した．本節では，タイプ別，装置別の機器のハザード率の異質性パラメータを推計する．

本章で着目する３つのタイプの機器（HDD，電源部，処理部）を，交通管制システムを構成する９つの中央局システムのいずれに設置されているかで分類し，さらに各中央局システムにおける３種類の用途，１）PC（モニタ，端末部で使用），２）サーバー（サーバー，処理装置で使用），３）その他装置（前述

した用途以外で使用）に細分化すれば，**表 3-5** に示すように27種類のカテゴリーを得ることができる．式(3.21)を用いて，各カテゴリーごとの異質性パラメータの最尤推計値を求めることができる．ただし，カテゴリー(i,j)において，該当する機器が存在しない場合もあるので，推計すべき各異質性パラメータの数は最終的にHDDが21個，電源部が9個，処理部が26個となった．**表 3-5** に推計した各異質性パラメータ$\hat{\varepsilon}_{ij}(\hat{\boldsymbol{\theta}})$の値と各タイプの各機器のサンプル数を示す．同表に示すように装置により異質性パラメータの最尤推計値は多様に分布しており，情報システムを構成する機器の劣化特性を表現するためにはハザード率の異質性を考慮することが必要であることが理解できる．また，対象とした機器が少数・多品種であり，機器特性の相違をダミー変数で表現する方法では推計効率が低くなることが推察できる．異質性パラメータの最尤推計値を用いれば，装置ごとの劣化特性を表す確定的なワイブル劣化ハザードモデル得ることができる．しかし，**表 3-5** に示すように，装置カテゴリーによってはサンプル数が極端に少なくなる場合がある．このため，装置カテゴリーごとに求めたワイブル劣化ハザードモデルの信頼性に問題が生じる可能性がある．そこで，装置カテゴリーをグループ化することにより，グループごとの平均的な劣化特性を表す集約的ワイブル劣化ハザードモデルを求めることとする．そこで，タイプ別，装置別に求めた異質性パラメータε_{ij}を，すべての装置に対して集計化した平均的なタイプ別異質性パラメータ$E\varepsilon_i$ $(i=1,\cdots,M)$を定義しよう．そのために，すべての装置に対して集計化した部分尤度関数を

$$\mathcal{L}_i^{\circ\circ}(\boldsymbol{\xi}_i, E\varepsilon_i : \hat{\boldsymbol{\theta}}_i) = \frac{\hat{\phi}^{\hat{\phi}}}{\Gamma(\hat{\phi})} \prod_{j=1}^{N_i} \prod_{k=1}^{L_{ij}} \left\{\hat{\gamma}_i \hat{m}(t_{ij}^k)^{\hat{m}-1}\right\}^{\delta_{ij}^k} E\varepsilon_i^{s_{ij}+\hat{\phi}-1} \exp\left\{-(\hat{\phi}+\hat{\gamma}_i\hat{\tau}_{ij})E\varepsilon_i\right\} \tag{3.27}$$

と定義する．異質性パラメータ$E\varepsilon_i$の最尤推計量は

$$\frac{\partial \ln \mathcal{L}_i^{\circ\circ}(\boldsymbol{\xi}_i, E\varepsilon_i : \hat{\boldsymbol{\theta}}_i)}{\partial E\varepsilon_i} = 0 \tag{3.28}$$

を満足するような$E\hat{\varepsilon}_i(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i)$として

$$E\hat{\varepsilon}_i(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i) = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} s_{ij} + \hat{\phi} - 1}{\sum_{j=1}^{N_i} \hat{\phi} + \hat{\gamma}\hat{\tau}_{ij}} \tag{3.29}$$

と表すことができる．同様に，異質性パラメータを，タイプ別，用途（PC，サーバー，その他装置）別に集計化した異質性パラメータ$E\varepsilon_{il}$ $(i,l=1,2,3)$の最尤推計量$E\hat{\varepsilon}_{il}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i)$は

$$E\hat{\varepsilon}_{il}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i) = \frac{\sum_{j\in\omega_l} s_{ij} + \hat{\phi} - 1}{\sum_{j\in\omega_l} \hat{\phi} + \hat{\gamma}\hat{\tau}_{ij}} \tag{3.30}$$

と表すことができる．ただし，lは機器の用途であり，$l=1$の時はPC，$l=2$の時はサーバー，$l=3$の時はその他の用途を表す．また，ω_lは，用途がlとなる装置の集合を表す．以上のような考え方で集計化した平均的異質パラメータの最尤推計量を**表 3-6** に示している． タイプ別に集計した平均的異質性パラメータを比較すれば，$E\hat{\varepsilon}_1(\hat{\boldsymbol{\theta}}) > E\hat{\varepsilon}_3(\hat{\boldsymbol{\theta}}) > E\hat{\varepsilon}_2(\hat{\boldsymbol{\theta}})$が成立している．さらに，到着密度パラメータについても同

表 3-6 異質性パラメータ

	HDD	電源部	処理部本体
$E\hat{\varepsilon}_i(\hat{\theta})$	0.923	0.205	0.431
$E\hat{\varepsilon}_{i1}(\hat{\theta})$	1.302	-	0.366
$E\hat{\varepsilon}_{i2}(\hat{\theta})$	0.900	-	0.527
$E\hat{\varepsilon}_{i3}(\hat{\theta})$	0.095	-	0.410

注）ーは，該当する用途に用いられる機器が存在しないことを示す．$E\hat{\varepsilon}_{il}(\hat{\theta})$ $(l = 1, 2, 3)$ は，それぞれPC，サーバー，その他の装置の平均的異質性パラメータを表す．

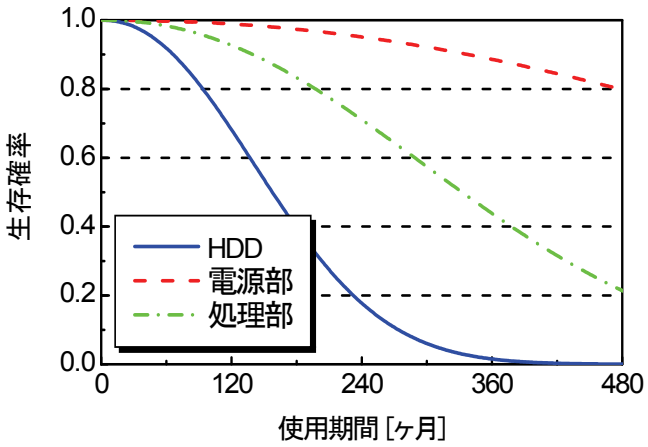


図 3-4 タイプ別の生存関数

様の関係が成り立っているので，ハザード率はHDDが最も大きく（最も故障しやすく），電源部が最も小さくなる．各タイプごとに得られた異質性パラメータを集約化した平均的異質パラメータ $E\hat{\varepsilon}_i(\hat{\boldsymbol{\theta}})$ を求めることにより，各タイプの機器の平均的な劣化特性を表すワイブル劣化ハザードモデルを得ることができる．各タイプ別に集計化した平均的な異質性パラメータ $E\hat{\varepsilon}_i(\hat{\boldsymbol{\theta}})$ $(i = 1, 2, 3)$ を用いて，各タイプ別の平均的な生存関数を求めた結果を**図 3-4** に示している．ここで，生存確率は全サンプルのうち，当該期間に生存しているサンプルの相対比率を表している．なお，機器の寿命は，一般的に耐用年数として評価されることが多い．同図は，生存確率に応じた耐用年数を示していると考えることができる．したがって，生存確率を管理指標として採用することで，任意の管理指標のもとでの耐用年数を評価することができる．ただし，管理指標は機器の重要性を勘案して設定する必要がある．**図 3-4** より，例えば生存確率が50%となる使用期間（耐用年数）は，HDDでは158ヶ月，電源部では804ヶ月，処理部では332ヶ月となっている．さらに，

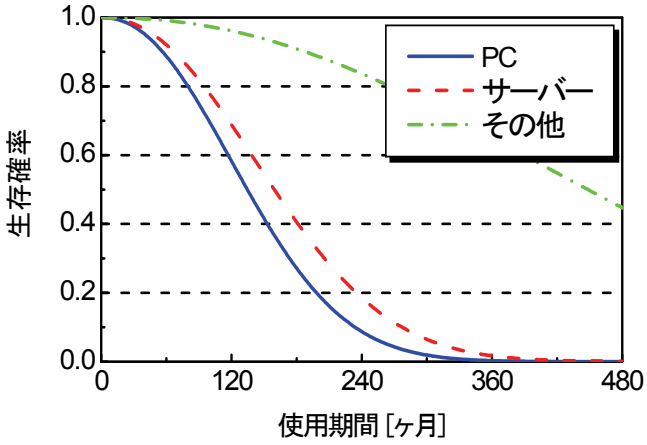


図 3-5　HDD の生存関数

HDD を 120ヶ月使用した際の生存確率は約 68.2%であり，240ヶ月使用した際の生存確率は約 17.8%である．これにより，HDD は，使用期間が長くなればなるほど故障発生確率が加速度的に大きくなることがわかる．また，電源部を 120ヶ月使用した際の生存確率は約 98.9%，240ヶ月使用した際の生存確率は約 95.1%であり，処理部ではそれぞれ約 92.7%，約 71.1%となる．したがって，電源部，処理部についても HDD と同様に使用期間が長くなればなるほど故障発生確率が加速度的に大きくなるといえるが，これら 3 つのタイプの中でも HDD が最も急な勾配を持ち，電源部が最も緩やかな勾配を持つことがわかる．

さらに，HDD，処理部の異質性パラメータを用途別に集計して求めた生存関数を**図 3-5**，**図 3-6** に示している．**図 3-5** は，HDD の生存関数を表している．同一の HDD でも，用途により HDD の使用環境が異なる．同図に示すように，PC，サーバー，その他の装置という 3 つの用途の中で，PC として利用した場合にもっとも故障が早くなる．異質性パラメータの最大値は PC 部であり，生存確率が 50%となる使用期間は 135ヶ月である．一方，異質性パラメータの最小値はその他装置で，生存確率が 50%となる使用期間は 448ヶ月である．また，**図 3-6** の処理部においては，サーバー使用の場合のハザード率がもっとも大きい値を示し，使用期間 303ヶ月で生存確率 50%となる．PC の場合，ハザード率がもっとも小さく，生存確率が 50%となる使用期間は 358ヶ月である．

本適用事例で示したように，本章で提案したランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルは，少数・多品種の類似の要素で構成されるシステムの劣化過程をモデル化するために有効な手法であることが理解できる．このように類似の多種類の要素で構成されるシステムとしては，本適用事例でとりあげた交通管制システムだけでなく，社会基盤システムを支援する多様な設備系システムが該当しよう．ランダム比例ワイ

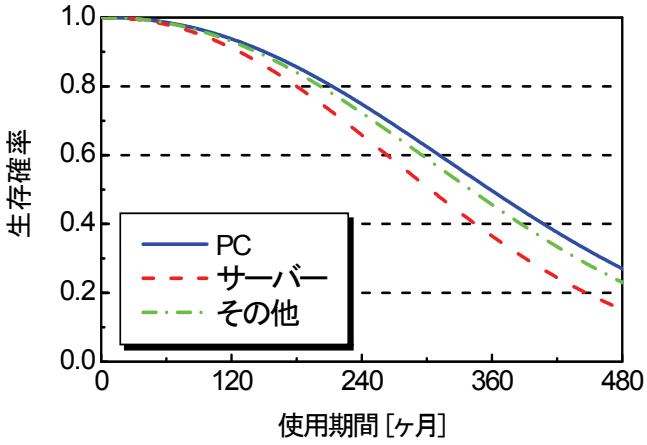


図 3-6 処理部の生存関数

ブル劣化ハザードモデルを用いることにより，機器・設備タイプや装置の多様性と対応した生存関数，寿命関数を推計することが可能であり，大規模設備システムの維持補修のためのライフサイクル費用評価の精緻化に資することが期待できよう．今後，適用事例を積み重ねることにより，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルの有効性を検証することが重要である．

3.5 結言

本章では，社会基盤施設を支援する大規模情報システムの機器レベルのアセットマネジメントを対象として，情報システムを構成する機器群の劣化故障予測モデルを提案した．その際，情報システムが，多数のタイプの機器で構成されることに着目し，タイプ間におけるハザード率の異質性を表現できるような故障解析モデルが必要であることを指摘した．このような故障率の異質性を操作的に表現するために，ワイブル劣化ハザードモデルをベースモデルとし，ハザード率の比例的異質性を標準ガンマ分布で表現したようなランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを定式化した．さらに，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を通じて，提案したハザードモデルの有効性を実証的に検証した．

参考文献

[1] Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.

[2] Gourieroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.

[3] Shin, H.C. and Madanat, S.M. : Development of stochastic model of pavement distress initiation, 土木学会論文集，No.744/IV-61, pp.61-67，2003.

[4] 青木一也，山本浩司，小林潔司:劣化予測のためのハザードモデルの推計，土木学会論文集，No.791/VI-67，pp.111-124，2005.

[5] 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推計，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.68-82, 2005.

[6] 青木一也，山本浩司，津田尚胤，小林潔司：多段階ワイブル劣化ハザードモデル，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.125-136, 2005.

[7] 津田尚胤，貝戸清之，山本浩司，小林潔司：ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計法，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.125-136, 2006.

[8] Gourieroux, C. and Visser, M.: A count data model with unobserved heterogeneity, *Journal of Econometrics*, Vol.79, pp.247-268, 1986.

[9] Cruz, M.G.: *Modelling, Measuring and Hedging Operational Risk*, Wiley, 2002.

[10] Cameron, A.C. and Trivedi, P.K.: Regression-based tests for overdispersion in the Poisson model, *Journal of Econometrics*, Vol.46, pp.347-34, 1990.

[11] Cameron, A.C. and Trivedi, P.K.: *Regression Analysis of Count Data*, Cambridge University Press, 1998.

[12] Mikosch, T.: *Non-Life Insurance Mathematics*, Springer, 2000.

[13] McNeil, J.A., Frey, R. and Embrechts, P.: *Quantitative Risk Management*, Princeton University Press, 2005.

[14] Maher, M.J. and Summersgill, I.: A comparative methdology for the fitting predictive accident models, *Accident Analysis & Prevention*, Vol.28, pp.281-296, 1996.

[15] Lawless, J.F.: Negative binomial and mixed Poisson regression, *Canadian Journal of Statistics*, Vol.15, pp.209-225, 1987.

[16] Piegorsch, W.W.: Maximum likelihood estimation for the negative binomial dispersion parameter, *Biometrika*, Vol.46, pp.863-867, 1990.

[17] 貝戸清之，小林潔司，加藤俊昌，生田紀子：道路施設の巡回頻度と障害物発生リスク，土木学会論文集F，Vol.63，No.1，pp.16-34，2007.

[18] 磯田和男，大野豊：数値計算ハンドブック，オーム社，1990.

[19] 森棟公夫：計量経済学，東洋経済新報社，1999.

第4章

劣化現象を考慮した動的故障解析

4.1 緒言

土木施設をはじめ，大型の社会基盤施設では，オペレーションの効率化や利用者への迅速な情報提供を目的として，各種のモニタリング機器，情報処理・出力装置が設置され，それらの情報はネットワークを経由して相互に伝達される．社会基盤施設の規模に伴い，情報施設の規模も大きくなる．このような情報施設のアセットマネジメントで留意すべき点として，1）情報施設が膨大な数の設備群で形成される複雑な階層構造を有すること，2）階層構造の最下層に位置する設備の故障が施設全体の故障に発展する可能性があること，さらに3）各機器の劣化が進展することにより，システム全体の信頼性が動的に変化することがあげられる．

従来より，フォールトツリー法をはじめとして，大規模システムの故障解析法に関する研究が蓄積されている．そこでは，システムを構成する要素やサブシステムの故障が，システム全体の故障に発展する可能性を，静的に分析することに主眼が置かれている．システムは数多くの機器で構成されるが，これらの機器の故障は，偶発系故障と消耗系故障に分類することができる．中でも，消耗系故障は要素や機器の劣化により発生する．したがって，システムが更新された時点から，稼動時間が増加するに従って，機器が故障する確率が増加する．これに伴って，システム全体の故障確率も，時間とともに増加するために，システム全体を対象とした動的故障解析が必要となる．

一般に，情報システムのアセットマネジメントでは，情報システムの更新戦略を検討することが重要な課題となる．その際，情報システムの更新費用や保守費用の総和（ライフサイクル費用）と，システムの故障確率が重要な評価指標となる．情報システムの保守業務において，機器の故障が発見されれば，直ちに新しい機器に交換される．しかし，システムの導入より一定時間が経過すれば，機器の在庫が枯渇したり，技術的対応に時間が必要となり，補修のための調整費用が増加する．それと同時に，システムの復旧時間が長期化し，システムの故障がもたらす社会的影響度が大きくなる．そこで，本章では，前述のライフサイクル費用，故障確率に加えて，システムの故障がもたらす社会的影響度も，システムの更新戦略を検討するための評価指標として取り上げる．

以上の問題意識の下に，本章では，大規模情報システムを構成する機器の故障確率の時間的変化をハザードモデルにより表現した上で，情報システム全体の故障発生事象をフォールトツリーで表現し，機器の故障確率の時間的変化に伴ってシステム全体の故障率の時間的変化を分析する方法論を提案する．さらに，情報システムの動的故障解析モデルを用いたモンテカルロ・シミュレーションにより，システムの期待ライフサイクル費用，社会的影響度の動的変化を分析する方法論も提案する．以下，**4.2**で本章の基本的な考え方を説明する．**4.3**では，中央交通管制システムの故障事象を静的フォールトツリーを用いて表現する．**4.4**では，機器の故障過程をハザードモデルにより定式化し，システムの動的故障解析モデルを提案する．**4.5**では，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を示す．

4.2 本章の基本的な考え方

4.2.1 従来の研究概要

本章では，機器の故障過程をハザードモデルで表現するとともに，これらの故障過程がシステム全体のシステムレベル，機能レベルの故障に及ぼす影響を動的故障解析モデルを用いて分析する．機器の統計的故障解析に関しては，ハザードモデル[1]･[2]を用いた研究事例が蓄積されている．また，アセットマネジメントの分野においても，多段階指数ハザードモデルをはじめとして，いくつかの新しい劣化ハザードモデル[3]－[5]が提案されている．情報システムの故障過程を分析する場合，機器の故障事象は，故障の有無という2値情報で表現されるため，伝統的なハザードモデルの適用が可能である．情報システムの機器の故障は，機器の劣化とは関係なく故障が発生する偶発的故障と，劣化が原因となって発生する消耗系故障に大別される．本章では，偶発的故障の発生過程を指数劣化ハザードモデル，消耗系発生過程をワイブル劣化ハザードモデルを用いて表現する．すでに，**3章**にて，交通管制システムが，膨大な種類の機器類で構成されていることに着目し，多品種・少数の機器群の故障過程をモデル化するために，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを提案した．本章では，大規模情報システムの機器の故障過程を，**3章**で提案したランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを用いて表現することとする．

一方，フォールトツリー分析に関しても，膨大な研究の蓄積[6]があり，原子炉故障解析をはじめとして数多くの適用事例が存在する．土木工学の分野でも，すでに適用事例がいくつか見出せる[7]･[8]．これらの研究では，個々の要素の故障（損傷）確率が，システム（構造物）全体の故障確率に及ぼす影響を分析し，システム（構造物）の信頼性や冗長性を分析することに主眼が置かれている．これに対して，システムの機器の劣化に伴う故障率の増加が，システム全体の信頼性や利用者や社会に及ぼす影響を分析することを目的とした動的故障解析に関してはそれほど研究が蓄積されていない．システムの動的故障解析に関しては，簡単な構造を有するシステムを対象とした分析のみが行われているのが実情である[9]．本章が対象とする大規模情報システムでは，消耗系故障が発生した機器が逐次交換される特性を有しており，システム

の信頼性の動的過程を解析的に検証することは極めて困難である．

本章では，ハザード率が異なる多様な機器で構成されているような実際的な情報システムを対象として，実用的な動的故障解析モデルを提案することを目的とする．このような問題意識に基づいて，本章ではモンテカルロ・シミュレーションにより個々の機器の故障事象の生起状況に関するサンプル過程を発生させることにより，システム全体の動的故障解析を実施する方法論を提案する．

4.2.2 情報システムのアセットマネジメントの課題

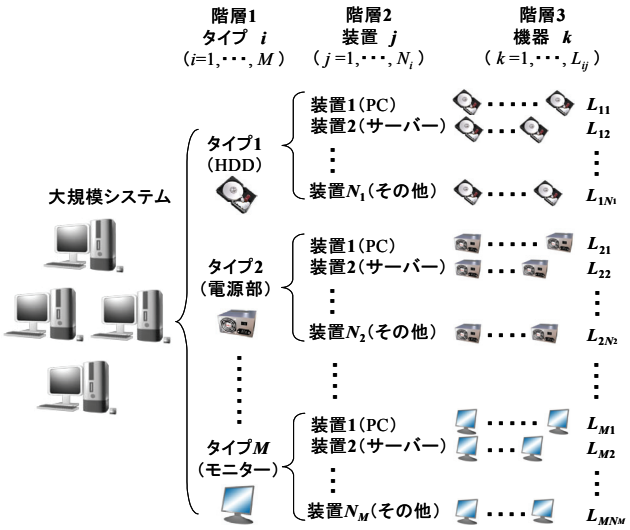
交通管制システムのような大規模情報システムのアセットマネジメントを実施する場合，情報システムの構造的，機能的な複雑性を考慮した検討が不可欠である．大規模情報システムのアセットマネジメントは，1）機器レベル，2）システムレベル，3）機能レベルという3つのレベルで構成される．本章では，2）機能レベル，および3）システムレベルにおけるアセットマネジメントを対象とする．

システムレベルのアセットマネジメントでは，サブシステム，機器群の故障確率を分析するとともに，各々の故障がシステム全体の機能障害に及ぼす影響の重大性に着目して，各サブシステム，機器群の保全戦略を検討することが重要な課題となる．具体的には，機器レベルで検討した故障解析モデルを用いて，サブシステムやシステム全体の故障解析を実施し，情報システムの信頼性について検討する．その上で，システムの信頼性とライフサイクル費用の関係を分析し，システムの望ましい信頼性水準を検討することが求められる．

一方で，機能レベルのアセットマネジメントでは，情報システムの故障解析だけでなく，情報システムの陳腐化に関する検討が必要となる．本章では，情報システムの陳腐化を検討する際，機器や部品の取り換えのために発生する取引費用の増加という現象に着目する．なお，情報システムの機能そのものの陳腐化に関しては，情報システムに対するニーズや価値に関する分析が不可欠である．本章は，情報システムの故障リスク，維持補修のためのライフサイクル費用の分析に焦点を置いており，情報システムの機能的陳腐化に関する議論については，**5章**にて，提案することとする．

4.2.3 情報システムの故障過程

情報システムの故障事象の発生過程をモデル化する．いま，情報システムを構成する機器群を，**図4-1**に示すように，1）タイプ，2）装置，3）機器という3つの階層レベルに整理する．「タイプ」は，ハードディスク（以下，HDDと略す），電源部，処理部，モニター等，機器の種類が該当する．情報システムはM種類のタイプの機器で構成されており，各機器のタイプを添え字i $(i = 1, \cdots, M)$で表す．さらに，タイプiの機器は，N_i個の「装置」で利用されており，装置の種類を添え字j $(j = 1, \cdots, N_i)$で表す．例えば，本章の実証分析の対象とする交通管制システムで使用されるHDDの場合，異なる9つの部局において，パーソナルコンピュータ（PCと略す），サーバ，その他という3種類の異なった用途で利用されている．した



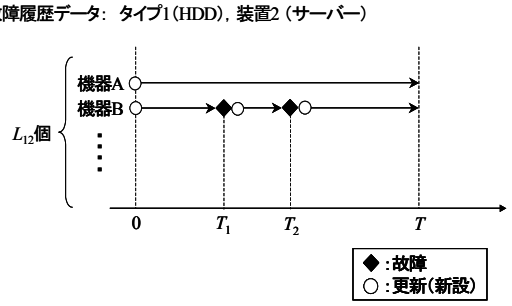
注）大規模システムはM個のタイプの機器群で構成される．また，タイプi $(i = 1, \cdots, M)$の機器は，N_i個の装置に用いられる．さらに，装置j $(j = 1, \cdots, N_i)$には，タイプiのL_{ij}個の機器が用いられており，各機器を添え字k $(k = 1, \cdots, L_{ij})$で表す．

図 4-1　情報システムの機器構成

がって，$N_1 = 9 \times 3 = 27$となる．当然ながら，装置により，「機器」の利用方法が異なるため，故障の発生確率も異なる（27通り存在する）．さらに，装置jにはL_{ij}個のタイプiの機器k $(k = 1, \cdots, L_{ij})$が用いられている．各タイプ，各装置を構成する機器のハザード率は異質であると考える．しかし，各装置を構成する同種のタイプの機器の故障過程は，同質のハザード率を用いて表現できると考える．なお，この場合には機器の総数は$\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N_i} L_{ij}$となる．

ここで，時点$t = 0$から，無限遠に続く連続時間軸を導入する．時点$t = 0$に，情報システムが，すべて現有のシステムに更新されたと考える．時点$t = 0$から，各機器の劣化が進展する．機器が故障すれば，直ちに新しい機器に交換される．交換される機器は，故障した機器と同様の性能を有すると仮定する．いま，時点$t = 0$から，時間Tが経過した時点$t = T$に着目する．この時，各機器に関して，**図 4-2**に示すような故障履歴が得られたと考える．図の例では，タイプ1（HDD）に分類される装置2（サーバー）の故障履歴を例示している．装置2は，L_{12}個の機器で構成されている．このうち，機器Aは，時点$t = 0$から一度も故障していない．機器Aに関して，観察された使用時間はTであり，当該機器の寿命は少なくとも使用時間Tより長いことが理解できる．一方，同図の機器Bの場合，すでに時点T_1, T_2において故障している．最初の故障時点までの寿命は$\zeta = T_1$であり，2回目の故障時点までの寿命は$\zeta = T_2 - T_1$となる．

このとき，各タイプの機器が，消耗故障系の故障特性を有すると考える．消耗故障系機器では，**図 4-3**に示すように，直近の更新時点からの経過時間が長くなるほど，故障の発生確率（ハザード率）が大きくな



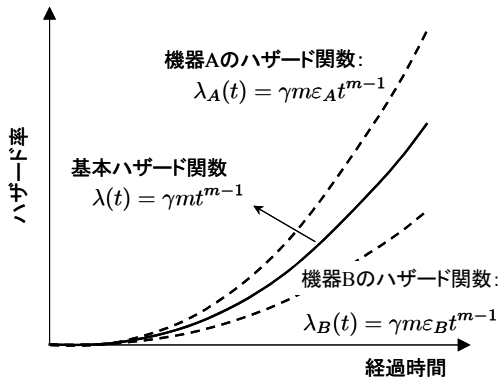
注）大規模システムはM個のタイプの機器群で構成される．また，タイプi $(i = 1, \cdots, M)$の機器は，N_i個の装置に用いられる．さらに，装置j $(j = 1, \cdots, N_i)$には，タイプiのL_{ij}個の機器が用いられており，各機器を添え字k $(k = 1, \cdots, L_{ij})$で表す．故障履歴データベースには，各機器ごとに，初期時点から故障が発生した時刻に関する情報が記載されている．

図 4-2　故障事象の履歴データ

る．このような消耗故障系機器の寿命分布が，ワイブル分布に従うと仮定する．さらに，異なる装置を構成する機器のハザード率が，時間の関数として**図 4-3** に示すように異なる関数で表現できると考える．このようなハザード率の時間的変化を表した関数をハザード関数と呼ぶ．ここで，各装置のハザード関数が，ある基準となるハザード関数に対して，互いに定数倍に拡大，もしくは縮小した関係にあると考える．このように互いに相似的な拡大・縮小関係にあるハザード関数群を表現するモデルを，比例ハザードモデルと呼ぶこととする．各装置を構成する各タイプの機器の故障過程が，互いに比例ハザードモデルで表現できる場合，ハザード率の異質性をハザード関数の比例定数の確率分布で表現することができる．

情報システムは，数多くの装置で構成されるが，各装置を構成する機器の数は十分でない場合が多い．ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルは，基準となるワイブル劣化ハザード関数のパラメータと，タイプ，装置間における比例定数の異質性分布を表す確率分布のパラメータを推計することにより，タイプ，装置間のハザード率の異質性を容易に表現できる．一方，ワイブル劣化ハザード率の異質性が比例ハザードモデルで表現できない場合，タイプ，装置ごとに異なるワイブル劣化ハザードモデルを推計することが必要となる．しかし，各装置を構成する機器の数が少ない場合，ワイブル劣化ハザードモデルを推計することが困難となる．

以上のことを考慮すれば，装置間の劣化過程の異質性をハザード関数の比例定数の確率分布として表現可能なランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルは，多品種・少数の機器構成を有する情報システムの故障過程を表現するために優れた性質を有しているといえる．



注）消耗系故障機器では，時間の経過とともに単位期間当りの故障の発生確率（ハザード率）が増加する．情報システムは多くの種類の機器で構成されており，装置によって故障の発生確率が異なる．このような装置ごとのハザード率の異質性を表現するためにランダムワイブル劣化ハザードモデルを用いる．

図 4-3 消耗故障系機器の故障過程

4.2.4 情報システムのリスクマネジメント

本章の分析対象とする中央局システムは，交通管制システムと施設制御システムから構成される．交通管制システムは，交通管理業務の中枢として，高速道路上で発生する様々な形態の交通障害事象に的確に対応するための情報収集と情報提供を担うシステムである．例えば，気象情報や交通量，渋滞情報等を予測し，情報板等を通じて利用者へそれらの情報を伝達する．施設制御システムは，高速道路上にある設備を監視・制御することにより，設備の障害を防止し正常に機能させることを主な役割としている．交通管制システムの場合には，交通管制情報を情報板，情報ターミナルという情報提供装置を通じて利用者に提供することを目的としている．一方で，施設制御システムは，高速道路上の設備の障害に関する情報を，設備の維持管理部局やオペレーション機器に提供することを目的としている．そこで，システムの機能を,「情報の最終利用者に対して，情報を的確に伝達すること」と定義する．情報システムがこのような機能のすべて（もしくは，その一部）を達成できない場合，システムの機能に障害が発生することになる．

本章では，中央局システムの機能障害のレベルを，それがもたらす情報システムの障害の重要度に着目して，1）すべての情報提供装置に対して情報が提供できない（重要度1），2）すべての情報提供システムに対して一部の情報提供ができない（重要度2），3）一部の情報提供装置に対して情報提供ができない（重要度3），4）一部の情報提供装置に対して一部の情報提供ができない（重要度4）という4つのカテゴリーに分類する．重要度1の障害が発生した場合，情報提供装置が稼動せず，必要な情報が最終ユーザーに伝達されない．重要度2の場合，情報提供装置は停止しないが，必要な（かつ重要な）情報の一部が最

終ユーザーに伝達されない．このうち，本章では，重要度1，重要度2のシステム障害をもたらす故障事象のみに着目する．もちろん，本章で提案する方法論を用いて，重要度3，重要度4のシステムの機能障害リスクを分析することができる．

さらに，情報システムの機能障害リスクを，1）機能障害の発生確率と2）期待影響度という2つの評価指標を用いて評価する．情報システムの機能障害の発生確率は，情報システムが稼動している期間中の各時点において，重要度1の機能障害（あるいは，重要度2の機能障害）が発生する確率を意味する．現実には，情報システムを構成する機器の故障発生過程には多くの不確実性を含んでいることから，機能障害の発生確率をゼロとすることは不可能であり，発生確率をある一定の許容値以下の水準に抑制することが課題となる．一方，システムの機能障害が発生しても，それが短時間で修復される場合には，社会や利用者に及ぼす影響が，それほど大きくない場合もある．しかし，機能障害が継続すれば，社会や利用者に及ぼす影響度は甚大となる．情報システムの導入時点から時間が経過するほど，代替の機器の入手が困難になったり，機器の調整に手間取ったりするなど，システムの機能障害が継続する時間が長くなる．本章では，システムの機能障害が社会や利用者にもたらす影響の度合いを「影響度」という評価指標で表現する．**4.3.3**で述べるように，システムの機能障害がもたらす影響度は，機能障害の継続時間の関数として表現される．システムの機能障害が継続する時間は，機能障害の原因となった機器のタイプに依存する．そこで，リスク管理指標として，期待影響度という評価指標を用いることとする．すなわち，情報システムのリスクマネジメント目標として，システムの機能障害の期待発生確率，期待影響度をある一定水準以下に抑制することが必要となる．

4.3 静的フォールト・ツリー分析

4.3.1 分析の目的

本章の分析対象とする中央局システムは，交通管制システムと施設制御システムから構成される．中央局システムの系統図を**図4-4**に示す．交通管制システムは，7つのサブ中央局で構成され，高速道路上に設置された情報板や情報ターミナルへの情報提供及び気象観測設備等による情報収集を行っている．一方，施設制御システムは，施設中央局（監視処理制御装置）と運転保守支援処理装置で構成され，トンネル内やインターチェンジ部等に設置された道路照明や非常用設備，CCTVカメラ等を監視・制御している．

中央局システムは，道路管制センターにおいて取り扱うデータの管理と処理を一元的に行っている．中央局システムは数多くの装置や機器から構成されているが，それらが設置されてからの経過時間が増加するとともに，故障発生確率が高くなりシステム全体のリスクも増加することが懸念される．さらには，将来の交通需要の増加，新設道路の開通に伴い，管理路線延長の増加によるシステムへの負荷が増加する可能性がある．このため，現行システムの故障発生メカニズムを明確にして管理リスクの計量化を行うとと

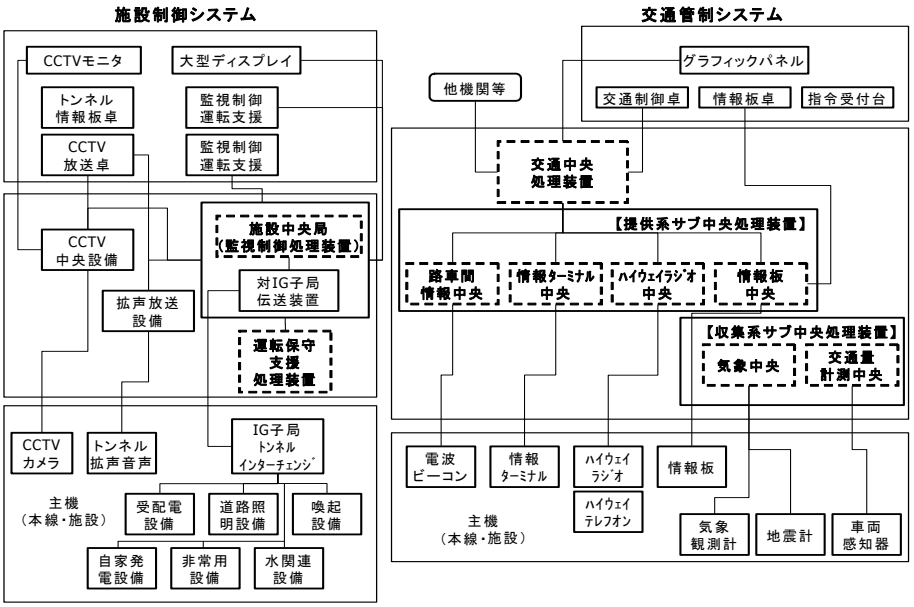


図 4-4　中央局システム系統図

もに，将来のシステム更新計画を立案することが必要となっている．

本章では，高速道路中央局システムを対象としてフォールト・ツリーを作成する．その際，頂上事象として，**4.2.4**で言及したように，重大度1の機能障害（すべての情報提供装置に対して情報が提供できない）が発生する事象，および重要度2の機能障害（すべての情報提供システムに対して一部の情報提供ができない）が発生する事象をとりあげる．

4.3.2　フォールト・ツリーの構築

フォールト・ツリー分析は，故障事象の発生がシステムの故障に発展するメカニズムを階層的に表現し，下位のレベルにある故障事象の発生確率に基づいて，分析対象とするシステム全体の機能障害リスクを評価するための手法であり，原子炉故障解析や航空工学などの分野の設計段階において多くの適用事例が存在している[6]．フォールト・ツリー分析では，対象とするシステムの機能障害を表す事象（頂上事象）を設定する．さらに，下位のレベルの故障事象の発生と，頂上事象が発生する条件や因果関係を明らかにし，下位の故障事象の発生が頂上事象の発生に展開する可能性をフォールト・ツリーを用いて表現する．事象間の因果関係を，ANDゲートとORゲートという論理構造を用いて表現することが可能である．下位事象の発生確率を用いて，より上位の故障事象や頂上事象の発生確率や期待影響度を逐次算出することができる．さらに，頂上事象とその要因である下位事象の発生確率と期待影響度に基づいて，システムの安全性，信頼性を向上させるための対策方法を検討することが可能である．

中央局システムのフォールト・ツリーを作成した結果を**図 4-5**に示している．同図は，中央局サブシステムの故障事象により，中央局システム全体の故障がどのように発生するかを表している．本章では，**図**

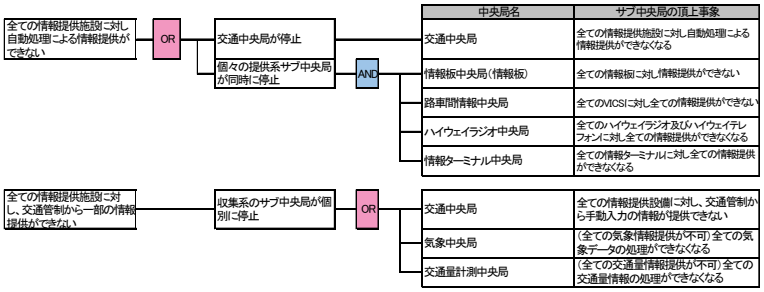


図 4-5 中央局システム フォールト・ツリー図

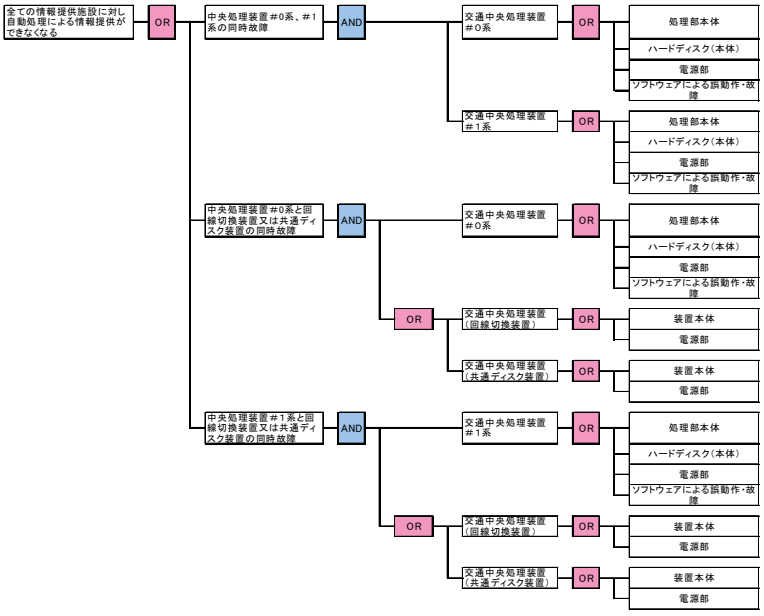
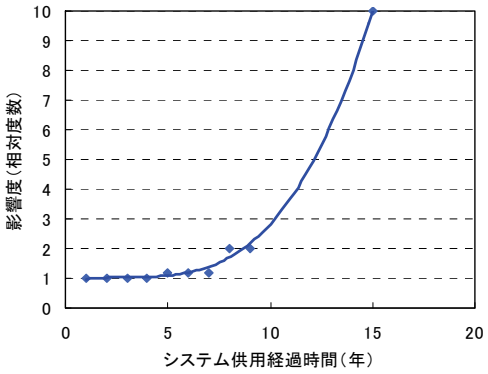


図 4-6 交通中央局 フォールト・ツリー図

4-5 に示す故障事象のうち，1）すべての情報提供装置に対して情報が提供できない（重要度1），2）すべての情報提供システムに対して一部の情報提供ができない（重要度2）場合を頂上事象として採用することとした．同図に示すように，これら2種類の頂上事象は，交通中央局，情報中央局，ハイウェイラジオ中央局，情報ターミナル中央局，気象中央局，交通量計測中央局に重要度1の頂上事象が発生した場合に生起することが理解できる．そこで，各サブシステムの頂上事象の発生を説明するフォールト・ツリーを作成した．以上のように作成したフォールト・ツリーの全体像は膨大な量に及ぶ．**図 4-6** には，これらのサブシステムのフォールト・ツリーの中で，交通中央局の頂上事象（全ての情報提供装置に対し自動処理による情報提供ができなくなる）に関するフォールト・ツリーを例示している．

4.3.3 影響度

中央局システムを管制している中日本高速道路株式会社横浜支社は，機器を供給する各情報機器メーカ



注）影響度曲線は，システムが更新時点からの経過時間と，故障が発生した際のシステムを復旧させるまでの時間の関係を示している．ここでは，**4.5** の適用事例で用いた影響度曲線を示している．同図は，機器メーカにおける部品・機器の在庫状況や保守対応期限に関するヒアリング等をもとに設定したものである．

図 4-7 影響度曲線

との間に保守対応契約を締結している．保守対応契約期間内では，情報機器メーカは部品の交換需要に対応できる体制を確保している．しかし，一般に，メーカは短いサイクルでモデルチェンジを実施するため，保守対応契約期間が経過したのちも，メーカ側に旧部品の在庫が存在している保証はない．旧部品の在庫が枯渇した場合には，別の部品で代替せざるを得ないが，システムを稼動させるために技術的な調整が必要となる．システム導入から時間が経過するにつれて，システム調整に要する費用や時間が増加する．さらに，当該システムの開発に従事した技術者が移動したり，ソフトウェア環境やOS等のモデルチェンジに伴う開発環境の変化が生じるため，システムの補修に迅速に対応できなくなる．このため，システムの導入から時間が経過するとともに，システムの故障発生時において障害調査，部品調達，技術者の修理時間が長期化する危険性が増加する．システムの頂上事象が継続する時間が長期化するほど，システムの故障が利用者や社会に及ぼす影響が大きくなる．

本章では，システムの故障発生から復旧までに要する時間を影響度と定義する．また，システム導入時点からの経過時間と復旧までに要する時間の関係を影響度曲線と呼ぶ．影響度曲線の一例を**図 4-7** に示すが，一般的に，システム導入からの経過時間が増加するほど，システムの復旧時間が長期化することになる．

4.3.4 頂上事象の発生確率と期待影響度算定

静的フォールト・ツリー分析では，フォールト・ツリーを構成する機器レベルにおける各機器の故障発生確率と影響度を与件として，情報システムの重要度1，もしくは重要度2の機能障害の発生確率，および期待影響度を計算することが重要な課題となる．このような頂上事象の発生確率，および期待影響度は，

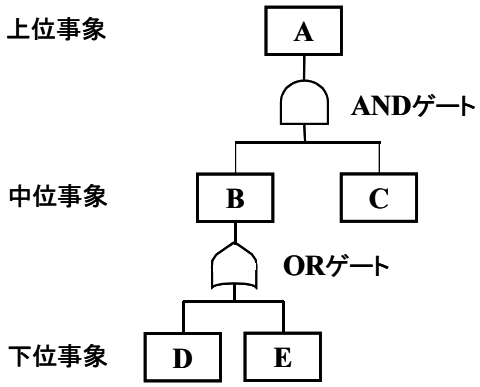


図 4-8 フォールト・ツリー図

ブール演算則を用いて計算することができる．いま，システム全体を対象とするフォールト・ツリーの中から，**図 4-8** に示すような簡単なフォールト・ツリーを取り出し，より上位の故障事象が発生する確率，およびその故障事象が生起した場合の期待影響度の計算方法を説明する．なお，以下に示すフォールト・ツリー分析の方法論自体は一般的なものであるが，読者の便宜を図るために概要を述べることを断っておく．詳細については，参考文献7) などを参照されたい．

上位事象をAとし，中位事象としてB，C，最下位の故障事象としてD，Eを考える．いま，最下位の故障事象DとEの故障状態を，それぞれ状態変数δ_D，δ_Eを用いて表そう．ただし，δ_D，δ_Eは，それぞれ故障事象D，Eが生起している場合に1を，そうでない場合に0となるダミー変数である．このとき，1階層上位の中間事象Bの発生事象を表す状態変数（ダミー変数）δ_Bが，故障事象DとEに関する「OR事象（事象DとEのどちらか一方が生起した場合に生起する事象)」の場合

$$\delta_B = \delta_D + \delta_E \tag{4.1}$$

と表される．ただし，演算子「+」はブール則に従い，$1+1=1$が成立する．つぎに，頂上事象Aは，中間事象BとCに関する「AND事象（事象BとCの両方が生起した場合に生起する事象)」であり，

$$\delta_A = \delta_B \times \delta_C \tag{4.2}$$

と表される．また，事象Aと事象Bが生起する確率$P(A), P(B)$は，それぞれ

$$P(A) = P(B)P(C) \tag{4.3a}$$

$$P(B) = P(D) + P(E) - P(D \cap E) \tag{4.3b}$$

と表される．

つぎに，期待影響度を故障発生率×影響度として定義する．ここで，影響度は，それぞれの機器の故障が利用者や社会，環境に及ぼす影響の程度を表す．いま，機器D，機器Eの影響度を，それぞれ$T(D), T(E)$

と表せば，これらの機器による故障の期待影響度は

$$RISK(D) = P(D)T(D) \tag{4.4a}$$

$$RISK(E) = P(E)T(E) \tag{4.4b}$$

と表せる．さらに，ANDゲートで結合される頂上事象Aの発生による影響度$T(A)$，およびORゲートで結合される事象Bの発生による影響度$T(B)$は

$$T(A) = \delta_B \delta_C \max\{T(B), T(C)\} \tag{4.5a}$$

$$T(B) = \delta_D T(D) + \delta_E T(E) - \delta_D \times \delta_E \min\{T(D), T(E)\} \tag{4.5b}$$

と定義できる．さらに，事象A，Bの期待影響度は

$$RISK(A) = P(B)P(C)\max\{T(B), T(C)\} \tag{4.6a}$$

$$RISK(B) = P(D)T(D) + P(E)T(E) - P(D \cap E) \min\{T(D), T(E)\} \tag{4.6b}$$

と表せる．

中央局システムの下位レベルの機器の故障確率を与件として，以上の演算ルールを用いて，中央局システムの頂上事象が発生する確率，およびその期待影響度を計算することができる．しかし，中央局システムは極めて多くの消耗故障系機器で構成されている．消耗故障系機器の故障率，および影響度は，初期時点からの経過時間とともに動的に変化する．したがって，中央局システムの頂上事象の発生確率，期待影響度も時間とともに変化する．さらに，機器が故障した場合，新しい機器に取り換えられることになる．このような中央局システムを構成する機器の更新過程と，それに伴うシステムの故障率の動的変化を解析的に分析することは不可能である．そこで，本章では中央局システムの更新過程のサンプルパスを乱数発生させるとともに，中央局システムの故障過程をシミュレートする方法をシステム化する．**4.4**では，中央局システムの下位レベルの機器群の動的故障・更新過程を記述する．さらに，モンテカルロ・シミュレーションにより，中央局システムの動的故障解析を行う方法を提案する．

4.4 動的故障解析モデル

4.4.1 中央局システムの故障・更新過程

中央局システムの故障事象の発生過程をモデル化する．前述したように，中央局システムでは，タイプi $(i = 1, \cdots, M)$の機器が，装置j $(j = 1, \cdots, N_i)$にL_{ij}個利用されている．タイプi，装置jに用いられて

いる機器 k $(k = 1, \cdots, L_{ij})$ を添え字の組 (i, j, k) で表そう．中央局システムは時点 $l_0 = 0$ に導入され，それ以降，連続的に稼動している．初期時点 $l_0 = 0$ を起点として無限に続く離散的時間軸 l_t $(t = 0, 1, \cdots)$ を考える．時間間隔 $\iota = l_{t+1} - l_t$ は十分小さく，期間 $[l_t, l_{t+1})$ において各機器の故障発生確率，影響度は一定であると考える．また，離散的時間軸を微小な単位期間 ι を用いて分割し，各単位期間を $\tau_t = [l_t, l_{t+1})$ $(t = 0, 1, \cdots)$ と表そう．時点 $l_0 = 0$ から，各機器の劣化が進展する．単位期間中に発生する故障は，すべて当該期間の期首に発生すると考える．機器が故障すれば，直ちに新しい機器への交換作業が始まる．機器の交換時間は，**4.3.2** で言及したように，初期時点からの経過時間により変化する．すなわち，初期時点より時間が経過するほど，機器の調達や調整のために要する時間が増加する．いま，期間 t $(t = 0, 1, 2, \cdots)$ において機器 (i, j, k) $(i = 1, \cdots, M; j = 1, \cdots, N_i, k = 1, \cdots, L_{ij})$ が故障した場合，交換のために $r_{ij}^{k}(t)$ 期間が必要になると考える．したがって，期間 t の期首に故障した機器 (i, j, k) は，期間 $[t, t+1, \cdots, t+r_{ij}^{k}(t)]$ にわたり故障が継続することになる．このように故障が継続した機器は，期間 $t + r_{ij}^{k}(t)$ の期末に交換が終了し，期間 $t + r_{ij}^{k}(t)$ の期首から再稼動すると考える．ただし，初期時点においては，単位期間中に直ちに更新が可能と考え，$r_{ij}^{k}(0) = 0$ が成立する．以下，期間 $r_{ij}^{k}(t)$ を交換期間長と呼ぶ．初期時点からの時間が経過するほど，部品等の調達や調整に時間を要することになり，$dr_{ij}^{k}(t)/dt \geq 0$ が成立する．期間 t $(t = 0, 1, \cdots)$ における機器の交換期間長ベクトルを $\boldsymbol{r}(t) = \{r_{ij}^{k}(t) : i = 1, \cdots, M; j = 1, \cdots, N_j; k = 1, \cdots, L_{ij}\}$ と表す．

ここで，機器 (i, j, k) の直近の更新時点からの時点 l_t における経過時間（以下，使用期間と呼ぶ）を $s_{ij}^{k}(t)$ と表す．また，期間 t における機器の使用期間ベクトルを $\boldsymbol{s}(t) = \{s_{ij}^{k}(t) : i = 1, \cdots, M; j = 1, \cdots, N_j; k = 1, \cdots, L_{ij}\}$ と表そう．ある期間に機器が更新されれば，つぎの期間の期首に使用時間はゼロに更新されることになる．また，単位期間 τ_t における機器 (i, j, k) の故障の有無を表す状態変数 $\delta_{ij}^{k}(t)$ を

$$\delta_{ij}^{k}(t) = \begin{cases} 1 & \text{該当する機器が故障している時} \\ 0 & \text{故障していない時} \end{cases}$$

と定義する．したがって，機器 (i, j, k) の故障事象が期間 τ_t に発生した場合，期間 $[t, t+1, \cdots, t+r_{ij}^{k}(t)]$ の間，$\delta_{ij}^{k}(n) = 1$ $(n = t, \cdots, t + r_{ij}^{k}(t))$ の状態が継続することになる．

いま，初期時点から一定期間が経過したある離散時点 $l_{\bar{t}}$ を現在時点と考える．初期時点 l_0 から，現在時点 $l_{\bar{t}}$ までの各機器の故障履歴を，$\bar{\boldsymbol{\delta}}_{t \leq \bar{t}} = (\bar{\boldsymbol{\delta}}_0, \cdots, \bar{\boldsymbol{\delta}}_{\bar{t}})$ と表そう．ただし，$\bar{\boldsymbol{\delta}}_t = \{\bar{\delta}_{ij}^{k}(t) : i = 1, \cdots, M; j = 1, \cdots, N_j; k = 1, \cdots, L_{ij}\}$ は，単位期間 τ_t $(t = 0, \cdots, \bar{t})$ における機器の故障履歴を表している．記号「 $\bar{}$ 」は，実績値であることを表している．また，各機器の故障履歴が与えられれば，各期間における使用時間の実績値 $\bar{s}_{ij}^{k}(t)$ を定義することができる．機器が故障している期間では，使用時間は定義されないが，計算上，便宜的に使用時間 0 と定義しておく．また，期間によっては，その期間中に故障した機器の更新が完了せず，複数の期間にまたがって故障が継続する可能性がある．いま，ある時点 t に故障状態にある機器 (i, j, k) が，復旧するまでに必要となる期間（以下，故障継続期間と呼ぶ）を $d_{ij}^{k}(t)$ と表そう．ここで，時点 t に故障した機器の復旧期間を $r_{ij}^{k}(t)$ とすれば，時点 t の故障継続期間は $d_{ij}^{k}(t) = r_{ij}^{k}(t)$ と表される．当然

のことながら，時点$t+s$において故障が継続している場合，$d_{ij}^{k}(t+s)=d_{ij}^{k}(t)-s\iota$となる．各期間における各機器の故障状態$\bar{\delta}_{ij}^{k}(t)$，使用期間$\bar{s}_{ij}^{k}(t)$，および故障継続時間$\bar{d}_{ij}^{k}(t)$の流列$\bar{\boldsymbol{\xi}}_t=\{(\bar{\delta}_{ij}^{k}(t),\bar{s}_{ij}^{k}(t),\bar{d}_{ij}^{k}(t)):i=1,\cdots,M;j=1,\cdots,N_j;k=1,\cdots,L_{ij}\}$を用いて，システムを構成する各機器の故障・更新過程（以下，故障・更新過程と呼ぶ）を記述することができる．

現在時点$l_{\bar{t}}$までは，故障履歴$\bar{\boldsymbol{\xi}}_t$ $(t=0,\cdots,\bar{t})$に関する情報を得ることができる．現在時点$l_{\bar{t}}$以降の故障・履歴過程は不確実な確率過程となる．中央局システムを構成する各機器は消耗故障系機器であり，その故障率は故障・履歴過程に依存する．さらに，更新のために要する期間長も時間とともに変化する．このように歴史依存的な確率過程を解析的に表現することは不可能と言わざるを得ない．しかし，各機器の故障確率は，直近の更新時点からの使用時間を与件として予測することができる．そこで，本章では，現時点以降の機器レベルの故障・更新過程を記述するために，モンテカルロ・シミュレーションを用いて多数のサンプルパスを発生させるとともに，その結果を集計化することにより目的とする中央局システムのリスク管理指標の動的な変化を追跡する．その際，各機器の故障の発生率を予測するモデルが必要となるが，本章では**3章**で開発したランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを用いることとする．

4.4.2 ランダムワイブル劣化ハザードモデル

3章にて，交通管制システムが，膨大な種類の機器類で構成されていることに着目し，多品種・少数の機器群の故障過程をモデル化するために，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを提案した．ハザードモデルに関する詳細は，参考文献1),2)に譲る．ここでは，読者の便宜を図るために，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを定式化するに先立って，**3章**にて提案したランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルについて簡単に説明する．

いま，ある機器が更新され，それが故障するまでの期間（以下，寿命と呼ぶ）に着目する．記述の簡単のために，タイプ，装置，機器に関する添え字を，しばらくの間省略する．さらに，機器は連続して使用されており，故障の有無が常時観測されていると考える．機器の寿命を確率変数ζで表し，確率密度関数$f(\zeta)$，分布関数$F(\zeta)$に従って分布すると仮定する．ただし，寿命ζの定義域は$[0,\infty)$である．いま，直近の更新時点から任意の使用期間$s\in[0,\infty]$に対して，機器が故障しないで生存する確率（以下，生存確率と呼ぶ）$\tilde{F}(s)$は，全事象確率1から使用期間sの間に機器が故障する累積故障確率$F(s)$を差し引いた値

$$\tilde{F}(s)=1-F(s) \tag{4.7}$$

により定義できる．ここで，機器が使用時間sにわたり生存し，かつ期間$[s,s+\Delta s]$中にはじめて故障する確率は

$$\lambda(s)\Delta s=\frac{f(s)\Delta s}{\tilde{F}(s)} \tag{4.8}$$

と表せる．機器が使用期間 s にわたり生存し，かつその瞬間に故障する確率密度 $\lambda(s)$ を「劣化ハザード関数」と呼ぶ．式 (4.7) の両辺を s に関して微分することにより，

$$\frac{d\tilde{F}(s)}{ds} = -f(s) \tag{4.9}$$

を得る．この時，式 (4.8) は

$$\lambda(s) = \frac{f(s)}{\tilde{F}(s)} = \frac{d}{ds}\left(-\log \tilde{F}(s)\right) \tag{4.10}$$

と変形できる．ここで，$\tilde{F}(0) = 1 - F(0) = 1$ を考慮し，式 (4.10) を積分すれば

$$\int_0^s \lambda(u)du = -\log \tilde{F}(s) \tag{4.11}$$

を得る．したがって，劣化ハザード関数 $\lambda(u)$ を用いれば，使用期間 s まで機器が生存する確率 $\tilde{F}(s)$ は

$$\tilde{F}(s) = \exp\left[-\int_0^s \lambda(u)du\right] \tag{4.12}$$

と表される．このように，劣化ハザード関数 $\lambda(u)$ の形式を決定すれば，機器の生存確率 $\tilde{F}(s)$ を導出することができる．さらに，$\tilde{F}(s) = 1 - F(s)$ より，機器の累積故障確率 $F(s)$ を求めることができる．ここで，劣化ハザード関数としてワイブル劣化ハザード関数

$$\lambda(s) = \gamma m s^{m-1} \tag{4.13}$$

を考える．ただし，γ は，到着密度を表すパラメータ，m は，時間を通じたハザード率の増加傾向を表す加速度パラメータである．ワイブル劣化ハザード関数を用いた場合，機器寿命の確率密度関数 $f(s)$，および機器の生存確率 $\tilde{F}(s)$ は，それぞれ

$$f(s) = \gamma m s^{m-1} \exp(-\gamma s^m) \tag{4.14a}$$

$$\tilde{F}(s) = \exp(-\gamma s^m) \tag{4.14b}$$

と表される．

ここで，再び，タイプ i $(i = 1, \cdots, M)$，装置 j $(j = 1, \cdots, N_i)$ の機器 k $(k = 1, \cdots, L_{ij})$ に着目する．**4.4.1** で定義したように，機器 (i, j, k) が前回更新されてから期間 t の期首までに経過した使用時間を $s_{ij}^k(t)$ と表す．各機器の故障事象の到着率がランダム比例ワイブル劣化ハザード関数

$$\lambda_{ij}(s_{ij}^k(t)) = \gamma_i m \varepsilon_{ij} \{s_{ij}^k(t)\}^{m-1} \tag{4.15}$$

に従うと考える．式 (4.15) は，ワイブル劣化ハザード関数 (式 (4.13)) に，タイプ i のハザード率の異質性 [10]･[11] を表すパラメータ γ_i とタイプ・装置間の異質性を表すパラメータ ε_{ij} が付加されている．これらの

異質性パラメータは，同一タイプ，同一装置を構成する機器に対して共通の値をとる．この時，タイプi，装置jの機器kの寿命分布を表す確率密度関数$f_{ij}(s_{ij}^k(t))$，および生存確率$\tilde{F}_{ij}(s_{ij}^k(t))$は，それぞれ

$$f_{ij}(s_{ij}^k(t)) = \gamma_i m \varepsilon_{ij} \{s_{ij}^k(t)\}^{m-1} \exp\left[-\gamma_i \varepsilon_{ij} \left\{s_{ij}^k(t)\right\}^m\right] \tag{4.16a}$$

$$\tilde{F}_{ij}(s_{ij}^k(t)) = \exp\left[-\gamma_i \varepsilon_{ij} \left\{s_{ij}^k(t)\right\}^m\right] \tag{4.16b}$$

と表される．ここで，モデル化のために，期間$\tau_t = [l_t, l_t + \iota)$中に発生する故障事象は，当該期間の期首にすべて発生すると考える．期間τ_tにおいて使用期間$s_{ij}^k(t)$の機器が故障する確率$p_{ij}^k(t)$は，使用期間$s_{ij}^k(t)$にわたり故障していないという条件の下で，

$$\begin{aligned}\tilde{p}_{ij}^k(t) &= \frac{\tilde{F}_{ij}(s_{ij}^k(t+1))}{\tilde{F}_{ij}(s_{ij}^k(t))} \\ &= \frac{\exp[-\gamma_i \varepsilon_{ij} \{s_{ij}^k(t+1)\}^m]}{\exp[-\gamma_i \varepsilon_{ij} \{s_{ij}^k(t)\}^m]} \\ &= \exp[-\gamma_i \varepsilon_{ij} \{(s_{ij}^k(t+1))^m - (s_{ij}^k(t))^m\}]\end{aligned} \tag{4.17}$$

と表される．したがって，使用期間$s_{ij}^k(t)$の機器が期間τ_t中に故障する確率$p_{ij}^k(t)$は

$$p_{ij}^k(t) = 1 - \tilde{p}_{ij}^k(t) \tag{4.18}$$

と表される．

なお，実証分析では異質性パラメータがガンマ分布に従うと仮定する．ガンマ分布は，その特殊型として指数分布を含んでおり，区間$[0, \infty)$で定義される指数族確率密度関数を表現できるという利点がある．一般に，ガンマ分布$G(\alpha, \beta)$の確率密度関数$g(\varepsilon_i : \alpha, \beta)$は

$$g(\varepsilon_i : \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \varepsilon_i^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\varepsilon_i}{\beta}\right) \tag{4.19}$$

と定義できる．ガンマ分布$G(\alpha, \beta)$の平均は$\mu = \alpha\beta$で，分散は$\sigma^2 = \alpha\beta^2$である．また，$\Gamma(\cdot)$はガンマ関数である．さらに，実証分析では，異質性パラメータの確率分布を基準化するために，平均値1，分散$1/\phi$のガンマ確率密度関数

$$\bar{g}(\varepsilon_i : \phi) = \frac{\phi^\phi}{\Gamma(\phi)} \varepsilon_i^{\phi-1} \exp(-\phi\varepsilon_i) \tag{4.20}$$

に従うと考えて，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを推計している．

4.4.3 機器レベルの故障・更新過程

初期時点l_0から，現在時点$l_{\bar{t}}$までに故障履歴$\bar{\boldsymbol{\xi}}_t$ $(t = 0, \cdots, \bar{t})$が与えられているとする．その上で，現在時点から将来時点にわたり，中央局システムの動的故障解析を試みよう．前述したように，機器レベルの

故障・更新過程を解析的に分析することは不可能であるため，モンテカルロ・シミュレーションにより故障・更新過程のサンプルパスを発生させ，システムの故障特性を分析することとする．サンプルパスは，故障・更新過程として起こり得る1つの確定的パスを表している．将来時点の故障・更新過程は，無数のサンプルパスの集合として記述できる．このようなサンプルパスの集合を，モンテカルロ・シミュレーションにより，以下のような手順で求めることとした．なお，読者の便宜を図るために，**図4-9**にフローチャートを示す．併せて参照されたい．

ステップ1　サンプルパスの番号を$q=1$に設定する．サンプルパスの目標個数Qと，ライフサイクル費用評価のための目標期間Zを設定する．

ステップ2　現在時点$l_{\bar{t}}$をシミュレーションの初期時点と考え，シミュレーション上のサンプル時点を$z=0$に設定する．初期時点の故障情報を$\tilde{\boldsymbol{\delta}}_0^q=\bar{\boldsymbol{\delta}}_{\bar{t}}$と表す．記号「 ˜ 」は，サンプルパスに関わる情報であることを示す．また，上付き添え字qはサンプルパス番号を表す．初期時点の継続期間ベクトル$\tilde{\boldsymbol{d}}^q(0)=\bar{\boldsymbol{d}}^q(\bar{t})$と表す．ただし，$\tilde{\boldsymbol{d}}^q(0)=\{\tilde{d}_{ij}^{kq}(0):i=1,\cdots,M;j=1,\cdots,N_j;k=1,\cdots,L_{ij}\}$である．$z=1$に更新する．

ステップ3　期間τ_zにおいて，前期から故障状態が継続している機器の集合（以下，故障継続集合と呼ぶ）を$\overline{\omega}_z^q=\{(i,j,k)\in\omega|\tilde{d}_{ij}^{kq}(z-1)>1\}$と表す．同様に，故障が継続していない機器の集合（以下，故障非継続集合と呼ぶ）を$\omega_z^q=\omega-\overline{\omega}_z^q$と定義する．

ステップ4　期間zの故障非継続集合ω_z^qに属する機器(i,j,k)に対して，式(4.18)に示す故障確率に基づいて乱数を発生させ，当該の機器が故障するか否かを決定する．その結果に基づいて，サンプルパスqにおける機器(i,j,k)の期間zにおける故障状態を

$$\tilde{\delta}_{ij}^{kq}(z)=\begin{cases}0 & \text{故障が発生しない時}\\ 1 & \text{故障が発生する時}\end{cases}$$
$$(i,j,k)\in\omega_z^q$$

と表す．また，$\tilde{d}_{ij}^{kq}(z)$ $(i,j,k)\in\overline{\omega}_z^q$を

$$\tilde{d}_{ij}^{kq}(z)=\begin{cases}r_{ij}^{kq}(z) & \tilde{\delta}_{ij}^{kq}(z)=1\text{の時}\\ 0 & \text{それ以外の時}\end{cases}$$
$$(i,j,k)\in\omega_z^q$$

に更新する．

ステップ5　故障継続期間ベクトル$\tilde{\boldsymbol{d}}^q(z+1)$の各要素$\tilde{d}_{ij}^{kq}(z+1)$を

$$\tilde{d}_{ij}^{kq}(z+1)=\begin{cases}\tilde{d}_{ij}^{kq}(z)-1 & \tilde{d}_{ij}^{kq}(z)\geq 1\text{の時}\\ 0 & \tilde{d}_{ij}^{kq}(z)=0\text{の時}\end{cases}$$

と表す．さらに，サンプルパスq上の期間zにおける故障継続集合$\overline{\omega}_{z+1}^q=\{(i,j,k)\in\omega|\tilde{d}_{ij}^{kq}(z+1)\geq 1\}$，故障非継続集合$\omega_{z+1}^q=\omega-\overline{\omega}_{z+1}^q$を定義する．

ステップ6　zが目標期間Zに到達しており，サンプルパス数qが目標数Qに到達していればアルゴリズム

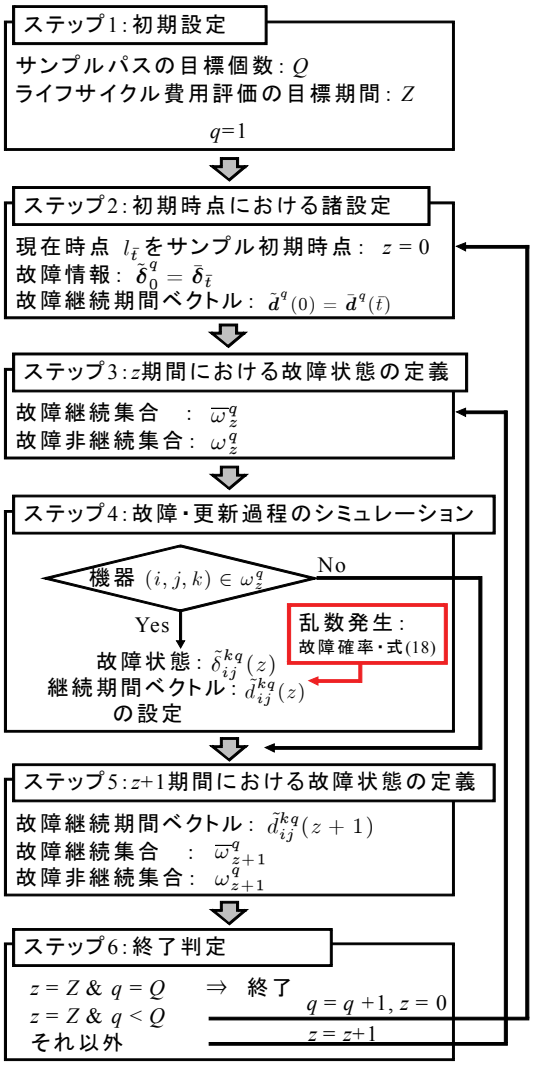


図 4-9 故障・更新過程シミュレーション

を終了する．zが目標期間 Zに到達しているが，サンプル数が目標回数に到達していない場合は，$q = q+1$, $z = 0$としてステップ2へ戻る．それ以外の場合には，$z = z+1$として，ステップ3へ戻る．

以上の手順により，現在時点$z = 0$を初期時点とする故障・更新過程に関する合計Q個のサンプルパスを獲得することができる．サンプルパスq $(q = 1, \cdots, Q)$は，故障・更新過程に関する確定的パスであり，その内容は次式で表される．

$$\begin{aligned}\tilde{\boldsymbol{\xi}}^q &= (\tilde{\boldsymbol{\xi}}_0^q, \cdots, \tilde{\boldsymbol{\xi}}_Z^q) \\ &= \{(\tilde{\delta}_{ij}^{kq}(z), \tilde{s}_{ij}^{kq}(z), \tilde{d}_{ij}^{kq}(z)) : i = 1, \cdots, M; j = \\ &\quad 1, \cdots, N_j; k = 1, \cdots, L_{ij}; z = 0, \cdots, Z\}\end{aligned} \tag{4.21}$$

4.4.4 リスクマネジメント指標

機器レベルにおける故障・更新過程のサンプルパス集合を用いれば，現在時点$z=0$以降における1）各機器の故障発生確率と，システムレベルにおける2）故障発生確率，および3）期待影響度を求めることができる．まず，機器$(i,j,k)\in\omega$の故障発生確率の動的過程$P_{ij}^{k}(z)$は，サンプルパスごとの故障状態を集計化することにより

$$P_{ij}^{k}(z)=\frac{\sum_{q=1}^{Q}\tilde{\delta}_{ij}^{kq}(z)}{Q} \tag{4.22}$$

と定義することができる．つぎに，システムレベルにおける故障発生確率も，サンプルパスごとの頂上事象に関する生起状態を集計化することにより求めることができる．すなわち，各機器の故障状態を表す情報$\tilde{\boldsymbol{\delta}}_{z}^{q}$に基づいて，**4.3.4**で言及したブール代数式(4.1),(4.2)を逐次用いることにより，サンプルパスqにおける期間zの頂上事象の生起状態$\overline{\delta}^{q}(z)$を求めることができる．ただし，

$$\overline{\delta}^{q}(z)=\begin{cases}0 & \text{頂上事象が生起しない時}\\ 1 & \text{頂上事象が生起する時}\end{cases} \tag{4.23}$$

である．この時，期間zにおけるシステムの故障発生確率$\overline{P}(z)$は

$$\overline{P}(z)=\frac{\sum_{q=1}^{Q}\overline{\delta}^{q}(z)}{Q} \tag{4.24}$$

と表せる．さらに，システムレベルの故障事象の期待影響度を定義する．いま，システムの故障事象が生起した場合，**4.3.4**に示した演算式(4.5b),(4.5a)を用いて影響度$T(z)$を各サンプルパスごとに求める．したがって，システムの故障事象の期待影響度$\overline{RISK}(z)$は

$$\overline{RISK}(z)=\frac{\sum_{q=1}^{Q}\overline{\delta}^{q}(z)T(z)}{Q} \tag{4.25}$$

と定義できる．最後に，中央システムの目標期間Zまでの維持補修に要する各期の期待ライフサイクル費用$\overline{C}(z)$は，期間zにおける機器(i,j,k)の更新費用を$C_{ij}^{k}(z)$とすれば

$$\overline{C}(z)=\frac{\sum_{q=1}^{Q}\overline{\delta}^{q}(z)C_{ij}^{k}(z)}{Q} \tag{4.26}$$

と表される．したがって，現在時点$z=0$における現在価値で評価した期待ライフサイクル費用の割引現在価値LCCは，割引率をρとすれば次式で表される．

$$LCC=\frac{\sum_{z=0}^{Z}\overline{C}(z)}{(1+\rho)^{z}} \tag{4.27}$$

4.5 適用事例

4.5.1 適用事例の概要

本章で提案した動的故障解析モデルを，中日本高速道路株式会社横浜支社が管理する中央局システムの更新問題に適用する．中央局システムの保守・更新については，管理コストの削減，安全・環境対策の促

進等の観点から，合理的なシステムの保守・更新計画策定のための方法論が求められている．同支社の中央局システムは，9つのサブ中央局システムにより構成され，各々の中央局の老朽化により個別に更新が実施されてきた．交通中央局システムは，前回の更新から供用後13年経過した時点で，個別に更新された実績を有している．

4.3.3で述べたように，システムが一括更新されてから時間が経過するにつれて，システムが復旧するまでに要する時間が着実に増加する．本章では，このような故障事象が社会・経済に及ぼす影響を影響度曲線で表現する．適用事例においては，影響度曲線を以下の手順で作成した．すなわち，1）各機器ごとに保守契約期間長，メーカにおける部品・機器の在庫状況や保守対応期限に関してヒアリング調査を実施し，システム導入時からの時間経過に伴う在庫状況の変化および技術者の対応の可能性等を考慮してシステム復旧までに要する時間の平均値を算出し，最後に最小二乗法によって2次曲線近似を行う．2）各機器の故障が生じた場合に復旧に要する時間を経年的に予測する．3）各頂上事象が発生した場合に，それが継続する時間を経年的に予測する．4）環境，コスト，安全性という3つの評価指標をとりあげ，システムの故障時間が，それぞれの評価指標に及ぼす影響を，評価指標別の影響度曲線で表現する．5）それぞれの評価指標の重みとして，同支社内のヒアリングにより，環境：コスト：安全＝35：45：20を設定する．6）評価指標別の影響度曲線を荷重平均し，影響度曲線を作成する．以上の手順で作成した影響度曲線は**図4-7**に示したとおりである．

4.5.2 シミュレーション条件

本適用事例では，**3章**にて提案しているランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを用いて，はじめに，HDD，電源部，処理部の3つのタイプの機器別にワイブル劣化ハザードモデルのパラメータ（γ_i，m）を推計する．つぎに，異質性パラメータを考慮してランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを推計する．このとき，3つのタイプの機器それぞれに対して，設定される異質性パラメータの数は同一タイプに属する装置の数と同数となる．今回の場合，装置数は，交通管制システムを構成する中央局システムの数と，各中央局システムでの用途の数で決まる．具体的には，HDDであれば，9つの中央局システムに設置され，最大で3種類の用途，1）PC（モニタ，端末部で使用），2）サーバー（サーバー，処理装置で使用），3）その他装置として使用されている．詳細は**表4-1**に示すが，今回の場合，異質性パラメータの数は，HDD：21，電源部：9，処理部本体：26となる（電源部には用途の区別はない）．

それぞれの異質性パラメーター（ε_{ij}）を推計した．ワイブル劣化ハザードモデル(4.15)は，すべてのタイプの機器に対して同一の劣化加速パラメータmを持つが，機器のタイプごとにハザード到着密度$\gamma_i m\varepsilon_{ij}$が比例的に異なるような劣化特性を表現している．ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果を**表4-2**に示している．さらに，異質性パラメータの推計結果を**表4-1**に示している．また，同表の推計結果の後に示した括弧の中の数字は故障履歴の数である．最大で96の履歴が存在する装置を確認すること

表 4-1 異質性パラメータ

	HDD	電源部	処理部本体
部局1（PC）	0.154 (1)	0.006 (5)	0.154(1)
（サーバー）	0.148 (1)	-	0.148 (1)
（その他）	-	-	0.008 (2)
部局2（PC）	0.123 (9)	0.120 (96)	0.770 (10)
（サーバー）	2.208 (17)	-	0.125 (7)
（その他）	0.161 (1)	-	0.008 (13)
部局3（PC）	0.146 (3)	0.007 (81)	0.146 (3)
（サーバー）	0.669 (23)	-	0.008 (15)
（その他）	0.133 (2)	-	0.860 (15)
部局4（PC）	1.437 (12)	0.004 (27)	0.688 (5)
（サーバー）	0.768 (22)	-	0.674 (7)
（その他）	0.006 (16)	-	0.833 (16)
部局5（PC）	0.753 (5)	0.008 (12)	0.113 (4)
（サーバー）	0.600 (15)	-	0.628 (9)
（その他）	-	-	-
部局6（PC）	0.134 (4)	0.008 (17)	0.132 (4)
（サーバー）	0.114 (8)	-	0.802 (6)
（その他）	-	-	0.142 (2)
部局7（PC）	0.147 (2)	0.007 (7)	0.147 (2)
（サーバー）	1.304 (9)	-	0.136 (2)
（その他）	-	-	0.009 (4)
部局8（PC）	5.400 (32)	1.360(51)	0.481 (23)
（サーバー）	1.833 (13)	-	1.508 (7)
（その他）	-	-	0.581 (16)
部局9（PC）	0.844 (4)	0.632 (10)	0.416 (3)
（サーバー）	0.138 (3)	-	0.948 (3)
（その他）	-	-	0.123 (5)

注）ーは，該当する部局に装置が存在しないことを示す．また，電源部にはPC，サーバー，装置の用途別の分類はないため，一括してPC部に記入している．() 内の数字は故障履歴の数である．

ができるが，大半はその装置単独での推計が極めて困難な情報しか蓄積されていない．このことから，交通管制システムが多品種・少数の機器で構成されていることがわかる．さらに，**表 4-3** に各機器の故障1件当たりの復旧単価と，交通中央局を一括更新した場合の概算費用を示している．

以上の条件のもとで，**4.4.3** に示した方法で，中央局システムの動的な故障確率と期待影響度の推移過程に関するサンプルパスを発生させた．シミュレーションはモンテカルロ法を用いており，サンプルパスを50万回発生させ，故障発生確率，期待影響度，期待ライフサイクル費用を算出した．

4.5.3 動的故障解析結果の考察

本適用事例では，中央局システム全体と各サブ中央局システムを対象とした動的故障解析を試みた．以上の分析結果は膨大な量に及ぶが，ここでは7つのサブ中央局で構成される交通管制システムのうち，交通中央局システムを対象とした動的故障解析の結果を紹介する．

表 4-2 モデルの推計結果

パラメータ		推定値	t-値
γ	γ_1	1.251E-5	-5.104E6
	γ_2	1.631E-6	-2.311E7
	γ_3	5.293E-6	-9.182E6
m		2.174	49.031
ϕ		1.193	2.182
対数尤度		402.441	

表 4-3 費用パラメータ

部品名	復旧単価（千円）
処理部本体（ソフト）	500
処理部本体（ハード）	1,500
装置本体	1,500
HDD	700
電源部	500
システム更新費用	480,000

注）復旧単価は故障1件当たりの復旧に要する費用を，システム更新費用は，交通中央局を一斉更新した場合に発生する費用の総額の概算を示している．

図 4-10 に，システム供用経過時間（年）と故障確率および期待影響度の推移の関係を図示している．故障確率は，交通中央局の機能停止確率と等しく，故障確率に故障発生後の復旧までの時間を考慮した影響度を乗じた値を期待影響度と定義する．交通中央局システムを構成する末端の部品（HDDや電源部等）に発生する故障は，フォールト・ツリーに従って頂上事象の機能停止へ影響を及ぼすことになる．故障が発見された部品は直ちに新しい部品へ取替えられる．各部品の故障過程は，時間依存型のランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルに従うとしていることから，各部品の故障確率は，部品の交換がない限り，システムの更新時点から時間が経過するにつれて増加する．その結果，中央局システム全体の故障確率も，システムの供用期間が長くなるにつれて増加している．

一方，期待影響度の推移をみると，システム供用開始から10年あたりまでは，故障確率と同様の推移を示しているが，約12年を越えてから加速度的に増加しており，20年経過後の期待影響度は，10年時点の約30倍の予測値を示している．これは，**4.3.3** および**図 4-7** で説明した影響度の増加関数がシミュレーション結果に反映されていること，すなわち，各機器の保守契約期間の終了時点（在庫品の品切れが予測される時点）から，システム復旧に要する時間が増加することを表している．このようにシステム供用期間が増加するにつれて，故障確率，及び影響度がともに増加するため，システムの供用期間がある一定限度を超えると，期待影響度が急速に増加するようになる．

つぎに，**図 4-11** には，交通中央局システムの更新間隔を変化させ，更新費用を含めた期待ライフサイクル費用と期待影響度の関係を図示したものである．本図の縦軸に示している期待ライフサイクル費用は，各部品の故障による復旧費用とシステム全体の更新費用の割引現在価値（割引率4%）の合計を更新間隔

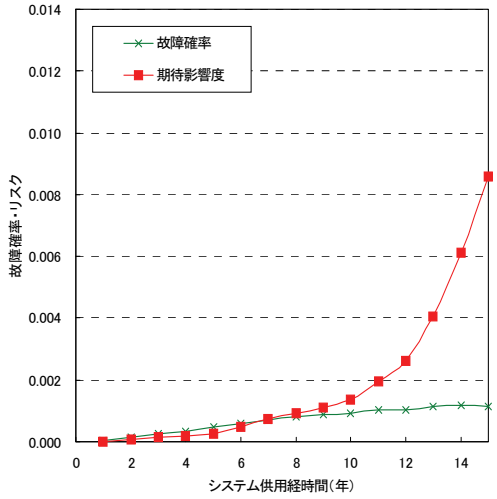


図 4-10 故障確率・期待影響度の推移

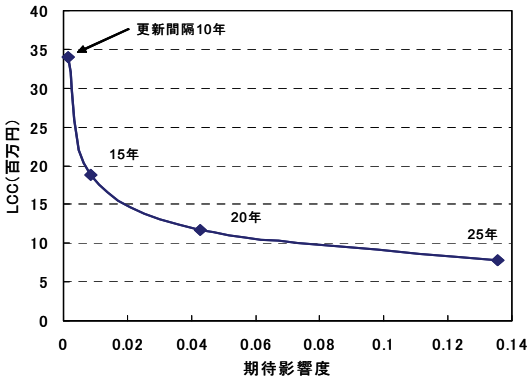


図 4-11 期待影響度と期待ライフサイクル費用の関係

で割った年平均費用として算出したものである．期待影響度はシステムの供用時間とともに増加するため，更新サイクルにおける最大値を代表値として採用している．交通中央局システムの更新間隔を 10 年から 25 年まで 1 年間隔で変化させ，期待ライフサイクル費用と期待影響度を算出した．**図 4-11** に示す通り，期待ライフサイクル費用と期待影響度はトレードオフの関係にあり，期待影響度を小さく抑えるためにはシステムの更新間隔を小さく設定する必要があり，そのためには更新費用を含めたライフサイクル費用が大きくなる．一方，前述したように，各機器の故障がもたらす影響度が 10 年を越えたあたりから急激に増加することから，本図においても更新間隔 15 年以上のケースでは，期待ライフサイクル費用に比較して期待影響度が急激に増加していることが読み取れる．以上のように，動的故障解析モデルを用いて，交通中央システムの故障確率の変化，期待影響度，および期待ライフサイクル費用の関係を明確にすることが可能であり，これらのアウトプットは，システム更新政策の意思決定のために有用な情報となりうる．

4.5.4 システム更新問題への拡張

最後に，本章で提案した動的故障解析モデルを，大規模交通管制システムの更新問題へ適用した結果について考察する．大規模交通管制システムの更新に関する意思決定においては，本論文で分析した期待ライフサイクル費用，故障確率，期待影響度といった評価項目以外にも，経営主体の財務状況や利用者便益等を総合的に勘案することが求められる．さらには，高速道路の延伸や新規建設路線が供用されるタイミング，情報機器の性能向上，交通管制システムの統廃合問題を含めた複雑な条件下での意思決定が必要とされる．この問題については，本章の域を超えており，**4.6** で研究課題としてとりまとめることとし，ここでは，動的故障解析モデルを用いた中央局システム全体の更新問題について分析した結果について考察するに留める．

交通管制システムは，交通中央局のほか，複数の交通中央局（サブ中央局）により構成している．現実の高速道路網では，複数の交通管制センターが空間的に分散立地しており，それぞれの路線が別の交通管制センターにより管理されている．しかし，昨今の情報技術の進展により，サブ中央局間の集約化が技術的に可能になってきている．このような複数の交通管制センターを統廃合することにより，より少数の交通管制システムに統合化するとともに，バックアップ機能を拡充し，システム全体の信頼性を向上するという政策も考えられる．本節では，動的故障解析モデルを用いて，このようなサブ中央局の集約政策や交通管制システムの空間的な統廃合が，システム更新費用も含めた期待ライフサイクル費用や期待影響度に及ぼす影響について分析することとする．

サブ中央局の集約政策として，1）現状のシステムを継続運用した場合，2）現状構成のまま現時点で管制システム全体を更新した場合，3）2箇所に分散されている交通管制システム（横浜と八王子）を現時点で統合した場合，の3つの代替案をとりあげる．その上で，本章で提案した動的故障解析モデルを用いて，これらの集約政策が，中央局システム全体の期待ライフサイクル費用や期待影響度に及ぼす影響についてシミュレートした．シミュレーションにあたっては，各サブ中央局の更新シナリオを以下のような考え方で設定した．前述したように，中日本高速道路株式会社横浜支社が管理する中央局システムは，1990年に一括更新された後，13年を経過した時点で，交通中央局システムのみが個別に更新されている．そこで，動的故障解析モデルを用いて，交通中央局システムが更新された時点における期待影響度を計算し，そのときの期待影響度を各サブ中央局システムの個別更新を検討するためのリスク管理基準（ベンチマーク）として設定する．その上で，動的故障解析モデルを用いて，各々のサブ中央局システムの期待影響度の経年的な変化を分析するとともに，各サブ中央局システムの期待影響度がリスク管理基準に到達した時点で，当該のサブ中央局システムを更新し，その時点でサブ中央局の集約化を随時進めていくこととした．このような各サブ中央局システムの更新シナリオを与件として，中央局システム全体の故障・更新過程をシミュレートする．ただし，サブ中央局システムの個別更新後は，その時点で機器を新規に調達し，保守対応契

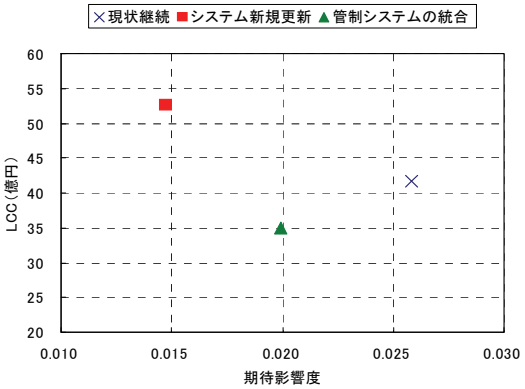
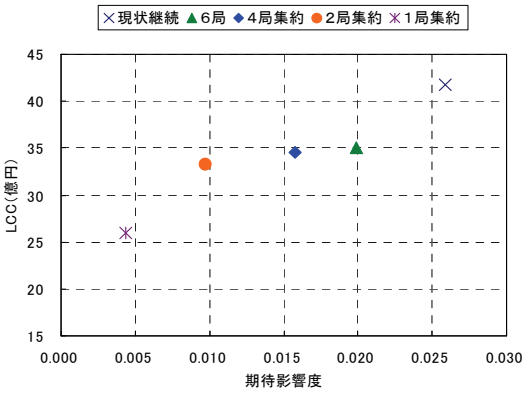


図 4-12 システム更新政策の評価結果（1）



注）**図 4-12** における管制システムの統合案は，本図の 6 局集約案に該当する．

図 4-13 システム更新政策の評価結果（2）

約を新たに締結するものと仮定する．更新直後後の影響度は 0 に更新される．ただし，システムを更新しても，従前のシステムと同様の故障性能を有すると仮定する．

図 4-12 は，1）現状のシステムを継続運用した場合，2）現状構成のまま現時点で管制システム全体を更新した場合，3）2 箇所に分散されている交通管制システム (横浜と八王子）を統合する場合，の 3 ケースに対するシミュレーション結果を示している．ただし，いずれの場合でも，システム故障のバックアップ体制は考慮しない．つまり，故障が発生したときには当該システムを人為的に在庫品や代替品で交換することを前提としている．現状システムを継続運用を続けた場合，最も期待影響度が高くなる．すなわち，各機器の保守対応期間に期限があり，故障時の復旧までの時間を要することが影響している．現状構成のまま現時点で管制システム全体を更新した場合，期待影響度を抑制できるが，期待ライフサイクル費用は増加する．これに対して，交通管制システムを統合した場合，管理すべき交通管制システムの数が減るために期待ライフサイクル費用を減少することができる．しかし，システムの統合により，システムがサービス

を提供する空間的範囲が増加するため，システムの故障がもたらす影響度が大きくなる．したがって，サブ中央局の集約化を図るためには，冗長性を強化したシステム構築を行うことにより，期待影響度を低減させることが前提となることが理解できる．

つぎに，システムの機能の2重化を行うことにより，システムの機能の冗長性を強化する場合を考える．ここで，2重化とは具体的に，導入を検討するシステムと同等の予備システムを並列的に設置し，システムに故障が発生したときには自動的に予備システムに切り替わるような機能を想定している．その上で，サブ中央局の集約化政策が，期待ライフサイクル費用や期待影響度に及ぼす影響について分析した．**図4-13**は，1）現状のシステムを継続運用した場合（2重化は行わない），2）2箇所の交通管制システムを統合し，システム構成は既存のまま集約せず更新した場合（2重化は行わない），3）2箇所の交通管制システムを統合し，さらにサブ中央局を4局，2局，1局にそれぞれ集約した場合のシミュレーション結果を示している．本シミュレーション結果に基づけば，サブ中央局を集約することにより，期待ライフサイクル費用，および期待影響度の最小化を同時に達成できることが理解できる．従来，リスク分散や空間的影響度を抑制するために，サブ中央局の分散化が望ましい政策と考えられてきた．しかし，以上の分析結果より，情報システムの2重化政策により，システム全体の信頼性を飛躍的に向上できることが明らかになった．このようなシステムの冗長化を達成できる場合，サブ中央局の分散化政策は，故障時の資材調達や技術者の派遣時間の増大を招き，結果として期待影響度の増加につながるため，必ずしも望ましい政策とは言えない．しかも，情報システムの費用低減の結果，システムの集約化により，期待ライフサイクル費用を低減することが可能であることが理解できる．

4.6 結言

本章では，社会基盤施設を支援する大規模情報システムのアセットマネジメントを対象として，情報システムの動的故障解析モデルを提案した．具体的には，情報システムの機器群の故障過程を，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルで表現した．さらに，機器の故障により情報システム全体の故障が発生するメカニズムをフォールト・ツリーにより表現した．その上で，時間の経過に伴って変化する機器群の故障率の変化や，機器の復旧時間の変化が，情報システムの故障発生確率や，故障がもたらす影響度の時間的変化に及ぼす影響をモンテカルロ・シミュレーションにより分析する方法論を提案した．さらに，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を通じて，提案した動的故障解析モデルの有効性を実証的に検証した．その結果，現状の交通管制システムを継続的に使用する場合と比較して，2箇所に分散された交通管制システムを統合し，さらに中央局を1局に集約させるケースが期待ライフサイクル費用と期待影響度を同時に最小化でき得ることを定量的に示した．

参考文献

[1] Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.

[2] Gourieroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.

[3] 青木一也，山本浩司，小林潔司:劣化予測のためのハザードモデルの推計，土木学会論文集，No.791/VI-67，pp.111-124，2005.

[4] 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.68-82, 2005.

[5] 青木一也，山本浩司，津田尚胤，小林潔司：多段階ワイブル劣化ハザードモデル，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.125-136，2005.

[6] Bedford, T. and Cooke, R.: *Probabilistic Risk Analysis*, Cambridge University Press, 2001, 金野秀敏訳：確率的リスク解析，基礎と方法，シュプリンガージャパン，2006.

[7] 大津宏康，大矢敏雄，水谷守，鵜沢哲史：企業における地震時対策機能の実用性に関する検討，地震工学研究発表会講演論文集，Vol.24，pp.1245-1248, 1997.

[8] 竹林亜夫，滝沢文教，木村正樹，三上元弘，奥井裕三：湧水によるトンネル切羽の不安定化に関する地震工学的研究，トンネル工学報告集，Vol.14，pp.61-68，2004.

[9] Dugan,J.B., Bavuso, S.J. and Boyd, M.A.: Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems, *Reliability, IEEE Transactions*, Vol.41, pp.363-377, 1992.

[10] Maher, M.J. and Summersgill, I.: A comparative methdology for the fitting predictive accident models, *Accident Analysis & Prevention*, Vol.28, pp.281-296, 1996.

[11] Piegorsch, W.W.: Maximum likelihood estimation for the negative binomial dispersion parameter, *Biometrika*, Vol.46, pp.863-867, 1990.

第5章

陳腐化を考慮した最適更新戦略

5.1 緒言

土木施設を運営・管理するために，大規模情報システムによる支援が不可欠である．施設利用者は，情報システムが提供するサービスから多くの便益を享受している．情報システムの機能に陳腐化が発生すれば，利用者に機会損失が発生することになる．情報システムの陳腐化が発生する理由はいろいろ考えられる．土木施設に対する需要の変化に伴い，既存の情報システムで機能的に十分に対応できなくなるという社会・経済的陳腐化が発生する．また，技術革新の結果によりシステムの技術的水準自体が陳腐化する場合がある [1].

本章では，大規模情報システムの社会・経済的，技術的陳腐化を考慮した最適更新問題をとりあげる．情報システムの技術革新が発生すれば，大規模情報システムの社会・経済的陳腐化が発生する．まず，情報技術の技術革新により，情報システムの導入費用が低下するため，より安価に高性能の情報システムを導入できる．このため，既往のシステムを集約化し，規模の経済性を追及することが可能となる．また，新しい技術を活用することにより，今までにない新しいサービス機能をユーザーに提供することが可能となる．その結果，時間の経過に伴って既往システムの技術的水準とその時点の技術水準の下で実現可能な最適なシステム水準との乖離が発生する．このように最適なシステムと現有のシステムの間の乖離の程度が増大していく現象をシステムの陳腐化と呼ぶ.

大規模情報システムの陳腐化が進展すれば，システムの更新を検討することが必要となる．しかし，システムの更新には膨大な費用が発生し，一度システムが導入されれば技術の変更は容易ではない．大規模システムの投資には，このようなシステムの不可分性，固定費用の存在，不可逆性が存在する．さらに，将来時点における大規模情報システムに対する利用者のニーズや新しい技術の利用可能性に関して不確実性が介在する．このような更新環境では，1) 更新時点を遅らせることにより発生する情報オプションと，2) 将来の拡張可能性を考慮することにより生じる拡張オプションが存在する．システムの更新戦略を考える場合，このようなオプション価値を明示的に考慮し，期待純便益を最大にするような更新時点とサブシステムのメニューを決定することが重要となる.

以上の問題意識の下に，本章では大規模情報システムの社会・経済的，技術的な陳腐化を考慮した最適システム更新モデルを定式化する．さらに，交通管制情報システムの更新問題を対象として，システムの集約化と新しいサブシステムの導入戦略を検討するための方法論を提案する．以下，**5.2**では本章の基本的な考え方を示す．**5.3**では，最適システム更新モデルを定式化し，**5.4**で，モデルの解法を示す．**5.5**で，適用事例を示す．

5.2 本章の基本的立場

5.2.1 従来の研究概要

高度情報技術等では，技術革新の進展の結果，既存情報システムに技術的陳腐化が発生することが多くの文献において指摘されている．しかし，技術的陳腐化に関する科学的・学術的なアプローチについては，ほとんど蓄積がないのが実情である．しかし，技術的陳腐化の原因となる技術革新に関しては，膨大な蓄積がある．1960年代，新古典派経済成長理論[2]やビンテージ理論[3]に基づいて，企業の生産性に関する長期的変化や生産性の異質性に関する実証的研究が蓄積された．

最近では，1990年代の情報技術の革新や，日本企業における生産資本の技術的陳腐化に対する懸念から，生産技術を対象とした技術進歩に関する実証的研究が再び注目されている[1]．多くの技術進歩は，新しい種類の資本・設備の中に体化される[2]･[3]．言い換えれば，技術革新の効果は，企業が新しい資本設備を導入することにより，生産性の向上として発現される．このような観点から，資本ストックの計測に際して，資本の物理的減耗や除却だけでなく，資本の技術的陳腐化を考慮した経済的減耗率を計測しようとする試みが見られる[4]．第1に，資本財の中古価格の差異[5]に着目し，資本財の2つの価格指数の差を用いて資本に体化された技術進歩を計測する方法[6]，価格指数の差から資本財の質の向上の大きさを計測する方法[7]が提案されている．第2の方法は生産関数の推定に基づいて資本に体化する技術進歩を求めるものである[8]･[9]．これらの既往の研究では，技術進歩は，1) 資本の質の向上，2) 価格の低下という2つの側面で把握でき，これらの可能性が生じた場合，技術的陳腐化が発生する．さらに，近年発展を遂げた内生的経済成長論[10]−[12]においては，技術革新による新しいメニューの増加による規模の経済性の重要性を指摘している．新技術が開発され，それが既存技術と並行して利用可能になることにより，生産性が持続的に増加する．このように，3) 新技術の利用可能メニューの増加によっても，既存技術の技術的陳腐化が発生する．

情報システムの陳腐化は，それを利用するユーザーのニーズや需要の変動によっても生じる．本章の実証分析でとりあげる交通情報システムの場合，新しい路線が開通することにより，既存の交通情報システムに対する負荷が急増し，情報システムの処理能力では対応しきれない場合が発生する．この場合，情報システムの更新が必要となる．あるいは，ドライバーのニーズが高度化し，既往のシステムでは対応でき

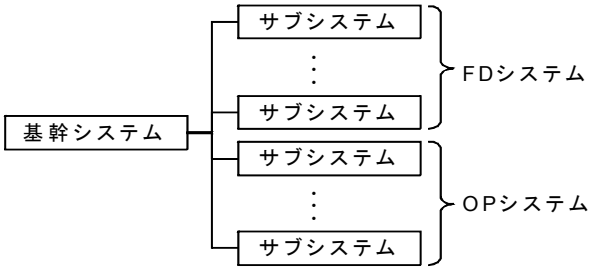


図 5-1 情報システムの構成

ないような新しい交通情報サービスの提供が求められることもある．情報システムの既存技術を継続的に利用し続ける場合，情報システムが更新により本来獲得できるであろう便益を逸失する (機会費用が発生する) ことになる．本章では，最適な技術を利用しないことによって機会費用が発生し，さらに機会費用が増加する現象をシステム陳腐化と呼ぶこととする．

従来より，需要の不確実な変化に対応して，供給容量を効率的に対応させる段階的供給戦略に関する研究が進展している．特に，不確実性下における投資戦略に関しては，リアルオプション理論の分野で膨大な研究 [13]−[16] の蓄積がある．しかし，これらの研究は，需要の不確実性に対応した容量の拡幅オプションや情報オプションの計量化を試みたものであり，本章で着目するような情報システムの集約化を議論するものではない．また，筆者らの知る限り，情報システムの技術的陳腐化を考慮して，情報システムの更新・集約戦略を分析した事例は本章以外には見当たらない．

5.2.2 情報システムの集約化・更新問題

本章で対象とする交通情報システムは，**図 5-1** に示すように，基幹システムと複数のサブシステムで構成されている．基幹システムは，データ処理，管理を担う中央局コンピュータであり，大規模情報システム全体を統括する中枢的システムである．一方，サブシステムは，特定の目的に特化された管理業務を執行するためのシステムである．IT 技術の進歩により，交通情報システムの高度化が可能である．第 1 に，基幹システムの処理能力の向上とともに，それまで独立に機能してきたサブシステムを，基幹システム上に集約することが可能となる．情報システムの集約化により，1）情報の蓄積，情報の流れを一元化でき，情報処理の効率化を図ることが可能となる．また，2）情報システムの集約化により，故障に対する対応能力も向上する．第 2 に，システムの冗長化やバックアップ機能の整備等を通じて，大規模情報システムの信頼性を向上させることが可能である．このような冗長化やバックアップにより，情報システムの集約化により発生する社会的・経済的損失リスクの拡大を抑止できる可能性がある．当然のことながら，大規模情報システムの集約化の程度は，基幹システムの情報処理能力に依存する．すでに **4 章**にて，中日本高速道路株式会社横浜支社が管理する中央局システムの動的故障解析を行い，現在分散している交通管制シス

テムを集約化することにより，期待ライフサイクル費用，および期待影響度の最小化を同時に達成できることを明らかにした．したがって，本章では，サブシステムにおける情報処理を基幹システムで一括して統括・管理するような，大規模情報システムの集約化政策の導入問題を考えることとする．

いま，システム管理者が基幹システムの最適な更新タイミングとサブシステムを集約する戦略を同時に決定する問題を考える．基幹システムの更新時に，サブシステムの更新も同時に実施され，システム全体の高度化が達成される．交通情報システムの陳腐化の問題を考慮する場合，従前にはなかった新しいサブシステムを大規模情報システムに搭載することを検討することが必要となる．この場合，大規模情報システムの更新時にシステムに搭載されるサブシステムもあれば，更新時点では搭載されず技術が成熟した段階で搭載されるものも存在する．さらに，情報システムには技術革新が発生する可能性がある．技術革新が起これば，同一処理能力を持つ情報システムの導入費用が低減する．基幹システムのCPU能力は，更新時点において決定され，一度更新を実施すると，途中の容量増加は不可能である．将来時点においてサブシステムを追加するためには，基幹システムの更新時点において，それを支援するためのCPU能力が確保されていなければならない．言い換えれば，システム更新時には，将来におけるサブシステムの追加導入の可能性を考慮することが必要である．いま，**図5-2**に示すように，大規模情報システムに搭載されるサブシステムを，1) 既存システムにおいて用いられているが，システム更新時に大規模情報システムに集約されるサブシステム (FDシステム) と，2) 既存システムでは導入されていないが，基幹システムが更新されたのちに，大規模情報システムに搭載されることが予定されているシステム (OPシステム) に分類する．

大規模情報システムの便益は，各サブシステムがもたらす便益の総和で表され，これらの便益は時間を通じて一定であると仮定する．一方，基幹システムは，それ自体としては便益をもたらさないが，基幹システムが存在しないとサブシステムは便益を発生しない．基幹システムのCPU能力は，導入可能なサブシステム数に影響を及ぼす．言い換えれば，基幹システムのCPU能力向上の価値は，導入可能なサブシステム数を増加させるというメニュー効果として現れる．システム管理者は，システムの更新によりもたらされる純便益を最大にするような基幹システムとサブシステムの更新・投資戦略を求める．その場合，システム管理の戦略は，システムの更新タイミングと処理能力，およびOPシステムの投資タイミングである．

5.3 最適システム更新モデル

5.3.1 前提条件

カレンダー時刻t_0を始点とする離散時間軸を考える (**図5-2**参照)．初期時点を$t = 0$とし，目標年次$t = T$までの離散時間軸$t = 0, 1, \cdots, T$を対象とする．離散時間軸上の点を時点と呼び，カレンダー時刻と区別する．散時間軸上で，システムの更新タイミングをτ_0と表記する．FDシステムの更新も，時点τ_0に実施される．OPシステムiが実用化される時点をs_i，導入される時点をτ_iと表す．情報システムが更新される時点

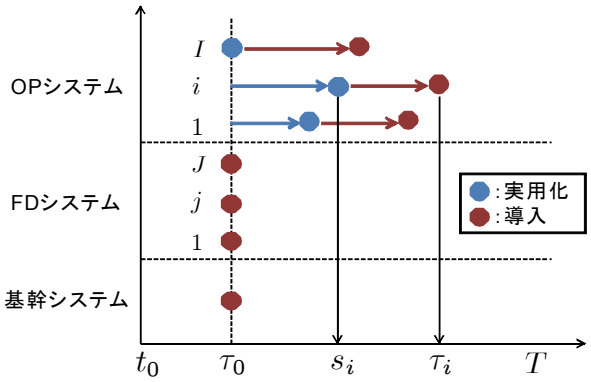


図 5-2 離散的時間軸
注) システムの更新時点をτ_0，OP システムiの実用化時点をs_i，導入時点をτ_iで表す.

τ_0において，OP システムiがすでに実用化されている場合もある．すなわち，$s_i < \tau_0$が成立する場合もある．しかし，基幹システムが更新されない限り，OP システムの導入は不可能であり，$\tau_i \geq \tau_0$ $(i = 1, \cdots, I)$が必ず成立する．

システム管理者は，1) システムの最適更新タイミングτ_0^*と，交通情報システムに搭載する OP システムの最適メニュー$\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*)$，2) OP システムの最適導入タイミング$\tau_i^*$ $(i \in \mathcal{H}(\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*)))$を決定する．ただし，OP システムメニュー$\boldsymbol{\iota}(\tau_0^*)$は，以下のように表現できる．

$$\boldsymbol{\iota}(\tau_0^*) = (\iota_1(\tau_0^*), \cdots, \iota_I(\tau_0^*)) \tag{5.1}$$
$$\iota_i(\tau_0^*) = \begin{cases} 1 & OP\text{システム}i\text{を搭載するとき} \\ 0 & \text{そうでないとき} \end{cases}$$

ただし，更新時点τ_0が異なれば，OP システムの導入費用が異なるため，ダミー変数$\iota_i(\tau_0)$はシステムの更新時点τ_0の関数となっている．また，集合$\mathcal{H}(\boldsymbol{\iota}(\tau_0^*))$は，時点$\tau_0^*$において導入した OP システムの集合を表し，

$$\mathcal{H}(\boldsymbol{\iota}(\tau_0^*)) = \{i | \iota_i(\tau_0^*) = 1 \ (i = 1, \cdots, I)\} \tag{5.2}$$

と定義できる．FD システムに関しては，初期時点において，「システムの更新時にシステムに搭載する」ことが確定しているサブシステムである．初期時点において，サブシステムの中で，FD システムと OP システムの区別が確定していると考える．サブシステムの中には，搭載が決定され，かつ実用化もされているが，現時点における導入費用が高いため，導入を見送っている技術も存在する．このようなサブシステムも，OP システムのカテゴリーに含める．

基幹システムの導入費用は，時間の経過に伴って減少する．さらに，搭載される OP システムメニュー$\boldsymbol{\iota}(\tau_0)$に依存する．基幹システムの導入費用を$C_0(\tau_0, \boldsymbol{\iota}(\tau_0))$と表す．OP システム，FD システムの導入費用も，時間が経過することにより，費用が減少すると仮定する．OP システムは，開発途上の要素技術が実用

化されなければ利用可能でないが，要素技術を支える情報処理システムが汎用的情報技術で構成されており，基幹システム，FD システムと同様に，時間の経過により導入費用が低減することになる．これらの導入費用関数は確定的であり，基幹システム，OP システム，FD システムの導入費用関数を

$$C_0(\tau_0, \boldsymbol{\iota}(\tau_0)) = C_0(\boldsymbol{\iota}(\tau_0)) \exp(-\zeta_0 \tau_0) \tag{5.3a}$$

$$C_i(\tau_i) = C_i \exp(-\zeta_i \tau_i) \tag{5.3b}$$

$$D_j(\tau_0) = C_j \exp(-\tilde{\zeta}_j \tau_0) \tag{5.3c}$$

と表す．ただし，ζ_i $(i = 1, \cdots, I)$, $\tilde{\zeta}_j$ $(j = 1, \cdots, J)$ は，技術革新による瞬間的価格低減率を表す．導入費用関数 $C_i(\tau_i)$ は，$s_i \leq \tau_i$ の領域で定義されるが，時点 s_i に関しては不確実性が存在する．サブシステムは基幹システムに接続されない限り便益を発生しない．大規模情報システムは，各サブシステムがもたらす便益の総和で表されると考える．OP システム i $(i = 1, \cdots, I)$ が時点 t でもたらす便益を e_i^t，FD システム j $(j = 1, \cdots, J)$ の便益を f_j^t と表す．

以下では，議論の見通しをよくするため，既存情報システムが存在せず，新たに情報システムを導入する場合をとりあげる．以下，**5.3.2** で OP システムの最適導入戦略を，**5.3.3** で OP システムのメニュー価値を定式化する．**5.3.4** で，システムの最適導入戦略を定式化する．その上で，**5.3.5** において，システム管理者がすでに情報システムを保有しており，新しいシステムに更新する戦略を検討する最適システム更新モデルに拡張する．

5.3.2 OP システムの最適導入戦略

システムを時点 τ_0 に更新した場合を考える．更新時点 τ_0 を始点とする離散軸上で，どの時点で OP システムを基幹システムに接続すべきかという問題を考える．更新時点 τ_0 において，FD システムはすでに基幹システムに搭載されている．更新時点において，すべての OP システムが実用化されているわけではない．あるいは，OP システムの中には，すでに実用化されているものの，導入費用が高額であり，導入を先送りしているような技術もある．このような OP システムの状態を記述するために，OP 技術の利用可能性を表す状態変数ベクトル $\boldsymbol{\gamma}(t) \in \Xi$ を

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{\gamma}(t) = (\gamma_1(t), \cdots, \gamma_I(t)) \\ &\gamma_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{時点 t に利用可能なとき} \\ 0 & \text{利用不可能なとき} \end{cases} \end{aligned} \tag{5.4}$$

と定義する．Ξ は，利用可能ベクトルの集合である．さらに，以下の集合を定義する．

$$\begin{cases} \mathcal{F}(t) & \text{時点 } t \text{ において実用化されている } OP \text{ システムの集合} \\ \mathcal{F}^c(t) & \text{実用化されていない } OP \text{ システムの集合} \end{cases} \tag{5.5}$$

ここで，OPシステムiが時点s_iに導入可能になったと考える．OPシステムの導入費用に不確実性が存在しないという仮定より，時点s_iでOPシステムの最適導入時点を一意的に決定できる．時点s_i以降の時点τ_i $(\tau_i \geq s_i)$において，OPシステムを導入した場合に獲得できる純便益の時点t $(\tau_i \geq t \geq s_i)$の当該期価値$W_i(\tau_i, t)$は

$$W_i(\tau_i, t) = \sum_{r=\tau_i}^{T} \eta^{(r-t)} \left(e_i^r - b_i^r\right) - \eta^{(\tau_i - t)} C_i(\tau_i) \tag{5.6}$$

と表される．ただし，$\eta^{(r-t)}$は，時点rの価値を時点tに割り戻すための割引因子であり，瞬間的割引率ρを用いて$\eta^{(r-t)} = \exp\{-\rho(r-t)\}$と定義される．また，$b_i^r$は，OPシステムの維持補修費用である．したがって，OPシステムの最適導入タイミング$\tau_i^*(s_i)$は

$$\tau_i^*(s_i) = \arg\max_{\tau_i \geq s_i} \{W_i(\tau_i, s_i)\} \tag{5.7}$$

と表される．ここに，記号argは，最大値を与える変数を指示する記号である．仮定より，OPシステムは基幹システムと接続されることにより，初めて効果を発揮することができる．いま，システム更新時点τ_0において，すでにOPシステムが実現化されていると考える．この時，OPシステムを最適タイミングに導入することにより獲得可能な更新時点τ_0における当該期割引純便益の最大値は

$$W_i^*(\tau_0) = \begin{cases} W_i(\tau_i^*(s_i), \tau_0) & \tau_i^*(s_i) \geq \tau_0 \text{の時} \\ W_i(\tau_0, \tau_0) & \tau_i^*(s_i) < \tau_0 \text{の時} \end{cases} \tag{5.8}$$

と表される．ただし，

$$W_i(\tau_i^*(s_i), \tau_0) = \sum_{t=\tau_i^*(s_i)}^{T} \eta^{(t-\tau_0)} \left(e_i^t - b_i^t\right) - \eta^{(\tau_i^*(s_i) - \tau_0)} C_i(\tau_i^*(s_i)) \tag{5.9a}$$

$$W_i(\tau_0, \tau_0) = \sum_{t=\tau_0}^{T} \eta^{t-\tau_0} \left(e_i^t - b_i^t\right) - C_i(\tau_0) \tag{5.9b}$$

である．

5.3.3 OPシステムのメニュー価値

システムの更新時点τ_0においては，OPシステムが実用化される時点は不確実である．このため，OPシステムの導入戦略を検討するためには，OPシステムが実現される過程をモデル化することが必要となる．いま，説明の都合上，一時的に，初期時点を起点とする連続時間軸を考え，各OPシステムが実用可能となる事象が，連続時間軸上でランダムに到着すると仮定する．OPシステムi $(i = 1, \cdots, I)$が初期時刻から利用可能となるまでの経過時間 (実現時間と呼ぼう) を確率変数ζ_iで表す．OPシステムiの実現時間が，

確率密度関数$h_i(\zeta_i)$，分布関数$F_i(\zeta_i)$に従うと仮定する．確率密度をハザード関数[17]･[18]$\lambda_i(y_i)$を用いて表現する．この時，ハザード関数は，時刻y_iまで実現していない確率$\tilde{F}_i(y_i)$を用いて，

$$\lambda_i(y_i)\Delta y_i = \frac{h_i(y_i)\Delta y_i}{\tilde{F}_i(y_i)} \tag{5.10}$$

と表せる．すなわち，指数ハザード関数$\lambda_i(y_i)$は，初期時刻から時間y_iが経過するまで，OPシステムが実用化されないという条件の下で，期間$[y_i, y_i+\Delta y_i)$中に実用化される条件付確率である．ハザード関数がサンプル時間軸上の時刻y_iに依存せず，常に一定値$\zeta_i > 0$をとる場合，指数ハザード関数

$$\lambda_i(y_i) = \zeta_i \tag{5.11}$$

が成立する．指数ハザード関数を用いれば，OPシステムの実現時期がy_i以上となる確率$\tilde{F}_i(y_i)$は，

$$\tilde{F}_i(y_i) = \exp(-\zeta_i y_i) \tag{5.12}$$

と表現できる．

ここで，再び．カレンダー時刻t_0を起点とする離散時間軸上の時点$t = 0, 1, 2, \cdots$を考える．2つの連続する時点間の間隔を1年間と考える．指数ハザード率ζ_iも，1年間を基本単位とするように定義されていると考える．時点tにシステムが実用化がされておらず，かつ時刻$t+1$においても，実用化されていない確率は

$$\begin{aligned}\tilde{\pi}_i^{t,t+1} &= \mathrm{Prob}\{\zeta_i \geq t+1 | \zeta_i \geq t\} \\ &= \frac{\exp\{-\zeta_i(t+1)\}}{\exp(-\zeta_i t)} = \exp(-\zeta_i)\end{aligned} \tag{5.13}$$

と表される．一方，期間$[t, t+1)$中に実用化が実現する確率は，

$$\pi_i^{t,t+1} = 1 - \tilde{\pi}_i^{t,t+1} = 1 - \exp(-\zeta_i) \tag{5.14}$$

と表せる．指数ハザードモデルを利用した時，推移確率は時刻tに依存しない．そこで，$\tilde{\pi}_i^{t,t+1} = \tilde{\pi}_i$，$\pi_i^{t,t+1} = \pi_i$と表現する．この時，時刻$t$において，OPシステム$i$ $(i = 1, \cdots, I)$の利用可能状態$\gamma_i(t) = 0$あるいは$\gamma_i(t) = 1$から，時刻$t+1$に利用可能状態$\gamma_i(t+1) = 0, 1$に推移する確率は，マルコフ推移確率行列

$$\boldsymbol{\Pi}_i = \begin{pmatrix} \tilde{\pi}_i & \pi_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{5.15}$$

で表される．時点τ_0において，OP技術が実現していないという条件の下で，時点t $(t \geq \tau_0 + 1)$において，はじめて実用化される確率は

$$p_i(t : \tau_0) = \pi_i(\tilde{\pi}_i)^{t-\tau_0-1} \ (i \in \mathcal{F}^c(\tau_0)) \tag{5.16}$$

と表される．したがって，時刻τ_0にOPシステムメニュー$\boldsymbol{\iota}(\tau_0)$を導入した場合に獲得可能なOPシステムの期待純便益の割引当該価値 (以下，メニュー価値と呼ぶ) は，

$$\begin{aligned} &R(\boldsymbol{\iota}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) \\ &= \sum_{t=\tau_0}^{T} \sum_{i \in \mathcal{H}(\boldsymbol{\iota}(\tau_0))} \eta^{(t-\tau_0)} p_i(t:\tau_0) W_i^*(t) \end{aligned} \tag{5.17}$$

と表される．ただし，ρは割引率，$\mathcal{H}(\boldsymbol{\iota}(\tau_0))$は，式(5.2)で定義されるように，OPシステムメニュー$\boldsymbol{\iota}(\tau_0)$に含まれるOPシステムの集合である．$W_i^*(t)$はOPシステム$i$が時点$t$に導実現した時に，最適にOPシステム$i$を導入することによって得られる最適純便益であり，

$$W_i^*(t) = \max_{\tau_i} \{W_i(\tau_i, t)\} \tag{5.18}$$

と表される．他方，時点τ_0にシステムを更新した場合，FDシステムがもたらす期待純便益の割引当該価値 (以下，FD価値と呼ぶ) は

$$Q(\tau_0) = \sum_{j=1}^{J} \left[\sum_{t=\tau_0}^{T} \eta^{(t-\tau_0)} \left(f_j^t - b_j^t \right) - D_j(\tau_0) \right] \tag{5.19}$$

と表される．

5.3.4 システムの最適導入戦略

システムの最適更新戦略を定式化するため，初期時点から一定期間にわたり，システムの更新を見送り，時点τ_0に到達した場合を考える．時点τ_0においては，1) システムを更新する，2) システムの更新を先送りする，という2つの選択肢がある．それぞれの選択肢を選択した場合に実現する情報システムの割引当該期価値を求める．

いま，時点τ_0に更新する場合を考える．この場合，システム管理者は，システムに搭載すべきOPシステムを選択しなければならない．時刻τ_0において，システムの搭載するOPシステムの内容を記述したメニュー戦略$\boldsymbol{\iota}(\tau_0)$を考える．ただし，OPシステムの利用可能性は，当該期τ_0において，$\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)$に確定していると考える．メニュー戦略$\boldsymbol{\iota}(\tau_0)$を採用したときに発生する純便益の割引き当該期価値$\Omega(\boldsymbol{\iota}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$は

$$\begin{aligned} &\Omega(\boldsymbol{\iota}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) \\ &= Q(\tau_0) + R(\boldsymbol{\iota}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) - C_0(\tau_0, \boldsymbol{\iota}(\tau_0)) - B_0^{\tau_0} \end{aligned} \tag{5.20}$$

となる．ただし，$B_0^{\tau_0}$は，時点τ_0にシステムを導入した場合に発生する基幹システムの維持管理費用であり，時点tで発生する維持管理費用d_0^tを用いて$B_0^{\tau_0} = \sum_{t=\tau_0}^{T} \eta^{t-\tau_0} d_0^t$と表される．さらに，時刻$\tau_0$において，最適メニューを求める問題は

$$\Omega^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) = \max_{\boldsymbol{\iota}(\tau_0)} \left\{ \Omega(\boldsymbol{\iota}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) \right\} \tag{5.21}$$

と定式化できる．つぎに，システムを更新しない場合を考える．この場合，時点tにおいて，便益も費用も発生しない．時点τ_0+1において，再びシステムの更新戦略を決定する問題に直面する．いま，時点τ_0+1の間に推移可能な利用状態ベクトルを$\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)=\{\gamma_1(\tau_0+1),\cdots,\gamma_I(\tau_0+1)\}$と表す．利用可能状態ベクトルは，OPシステム$i\in\mathcal{F}^c(t)$に関して，$\gamma_i(\tau_0+1)$の値が0もしくは1の状態を想定するとともに，すべての$i\in\mathcal{F}^c(t)$に関して網羅的に組み合わせることにより得られる．ただし，$i\in\mathcal{F}(t)$であるOPシステムに関しては，すでにτ_0において$\gamma_i(\tau_0)=1$が成立しており，時点τ_0+1においても$\gamma_i(\tau_0+1)=1$が成立しなければならない．このように，時点τ_0+1において成立しうる利用可能ベクトルは，時点τ_0における利用可能ベクトルの実現値$\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)$に依存している．このことを明示的に表現するため，時点$t+1$において実現可能な利用可能ベクトル集合を$\Xi(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$と表現する．

OPシステムの利用可能状況が，時点τ_0における$\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)$から，時点$\tau_0+1$において$\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)$に推移する確率$q_{\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)}(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$ $(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)\in\Xi(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$は

$$\begin{aligned}&q_{\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)}(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))\\&=\prod_{i\in\mathcal{F}^c(\tau_0)}\pi_i^{\gamma_i(\tau_0+1)}(1-\tilde{\pi}_i)^{(1-\gamma_i(\tau_0+1))}\end{aligned}\tag{5.22}$$

と表される．この時，時点τ_0にシステムの導入を見送り，時点τ_0+1に$\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)\in\Xi(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$が実現し，それ以降の時点において最適システム更新戦略を採用した場合に獲得できるOPシステムの部分純便益の当該期価値を$V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1))$と表す．この時，時点$\tau_0$にシステムの導入を見送った時に獲得できるOPシステムの期待純便益の当該期価値は

$$\begin{aligned}&\Psi^*(\tau_0+1)\\&=\sum_{\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)\in\Xi(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))}q_{\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)}(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1))\end{aligned}\tag{5.23}$$

と表される．したがって，時点τ_0 $(\tau_0=0,\cdots,T-1)$におけるシステム更新部分問題は

$$\begin{aligned}&V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))\\&=\max\left\{\Omega^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)),\eta\Psi^*(\tau_0+1)\right\}\end{aligned}\tag{5.24}$$

と定式化される．部分問題(5.24)の右辺に含まれる$\Psi^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1))$は，式(5.23)で示すように最適値関数$V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1))$が含まれており，再帰的関数方程式になっている．

5.3.5 最適システム更新モデルの定式化

以上の議論では，既存の情報システムが存在せず，新たに情報システムを導入する場合を想定していた．本章の適用事例でとりあげるように，現実にはすでに情報システムが存在しており，既存の情報システム

を新しいシステムに切り替えることが問題になっている場合が少なくない．この場合，**5.2.2** で議論したように，既存システムの陳腐化を明示的にモデル化することが必要となる．本章では，既往システムの陳腐化が発生する理由として，1) 既往システムの物理的劣化が進展し，システムの維持費用が高くなること，2) 現行のFDシステムが技術が低水準であり，利用者が十分な便益を得ていないこと，3) 新しいOPシステムが利用可能でないこと，をとりあげる．

再び，初期時点$t=0$を起点とする離散時間軸を考える．時刻τ_0まで，既存情報システムを継続的に利用してきた場合を考える．その上で，時点τ_0において,「新しいシステムに更新すべきかどうか」を検討する問題をとりあげる．この場合，時点τ_0において，システム管理者は，1) システムを更新する，2) システム更新を保留し，既存システムを少なくとも1期間継続して使用する，という選択肢が利用可能である．システムを更新する場合，式(5.21)で表される期待純便益$\Omega^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$を獲得する．一方，システムの更新を保留した場合，既存システムの維持管理費用$b_i(\tau_0)$が発生する．維持管理費用は，時間が経過するほど逓増すると考える．既存システムには，技術水準が低いFDシステムが搭載されている．旧システムがもたらす便益は$\underline{f}_j$ $(j=1,\cdots,J)$であり，新システムの便益f_jと比較して$f_j > \underline{f}_j$が成立する．さらに，既存システムにはOPシステムは搭載されておらず，OPシステムによる便益は発生しない．この時，時点τ_0において，既存システムを継続利用することにより獲得できる期待純便益は

$$H^*(\tau_0)=\sum_{j=1}^{J}\Big(\underline{f}_j-b_j(\tau_0)\Big)-b_0(\tau_0)+\eta\Psi^*(\tau_0+1) \tag{5.25}$$

と表される．ただし，$b_j(\tau_0)$ $(j=1,\cdots,J), b_0(\tau_0)$は時点$\tau_0$におけるFDシステム，基幹システムの維持管理費用である．$\Psi^*(\tau_0+1)$は，式(5.24)で定義される．この時，最適システム更新モデルは，

$$V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))=\max\Big\{\Omega^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)),H^*(\tau_0)\Big\} \tag{5.26}$$

と定式化できる．部分問題(5.24)と同様に，式(5.26)は最適値関数$V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$に関する再帰的関数方程式になっている．

5.4 最適システム更新モデルの解法

5.4.1 モデルの基本構造

最適システム更新モデルは，1) 各OPシステムの最適導入タイミングを求める部分問題 (部分問題1)，2) システム更新時点を与件としてOPシステムメニューを求める部分問題 (部分問題2)，および3) システムの更新タイミングを検定する主問題で構成される．これら3つの問題は，それぞれ

$$W_i^*(t)=\max_{\tau_i\geq t}\{W_i(\tau_i,t)\} \tag{5.27a}$$

$$\Omega^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) = \max_{\boldsymbol{\iota}(\tau_0)} \left\{ \Omega(\boldsymbol{\iota}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) \right\} \tag{5.27b}$$

$$V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) = \max \left\{ \Omega^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)), H^*(\tau_0) \right\} \tag{5.27c}$$

と定式化できる．ただし，

$$W_i(\tau_i, t) = \sum_{r=\tau_i \geq t}^{T} \eta^{(r-t)} \left(e_i^r - b_i^r\right) - \eta^{(\tau_i - t)} C_i(\tau_i) \tag{5.28a}$$

$$\Omega(\boldsymbol{\iota}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) = Q(\tau_0) + R(\boldsymbol{\iota}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) - C_0(\tau_0, \boldsymbol{\iota}(\tau_0)) - B_0^{\tau_0} \tag{5.28b}$$

$$Q(\tau_0) = \sum_{j=1}^{J} \left[\sum_{t=\tau_0}^{T} \eta^{(t-\tau_0)} \left(f_j^t - b_j^t\right) - D_j(\tau_0) \right] \tag{5.28c}$$

$$R(\boldsymbol{\iota}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) = \sum_{t=\tau_0}^{T} \sum_{i \in \mathcal{H}(\boldsymbol{\iota}(\tau_0))} \eta^{(t-\tau_0)} p_i(t : \tau_0) W_i^*(t) \tag{5.28d}$$

$$H^*(\tau_0) = \sum_{j=1}^{J} \left\{ \underline{f}_j - b_j(\tau_0) \right\} - b_0(\tau_0) + \eta \sum_{\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1) \in \Xi(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))} q_{\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)}(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)) \tag{5.28e}$$

である．この内，部分問題1(式(5.27a)参照)，部分問題2 (式(5.27b)参照) は，通常の最適化問題である．主問題 (式(5.27c)) は，再帰方程式で定義されており，部分問題1，部分問題2の最適解を求めることにより，主問題に含まれる関数形を特定化することができる．その結果，最適システム更新モデルは，再帰方程式(5.27c)で記述される確率動的計画問題に帰着される．

5.4.2 解法

最適システム更新モデルは，標準的な確率動的計画問題であり，動的計画法の解法を用いて解くことができる．時点τ_0におけるOPシステムの実用可能性を表すベクトルを$\boldsymbol{\gamma}(\tau_0) \in \Xi$と表す．最適値関数$V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$は，状態変数$\boldsymbol{\gamma}(\tau_0) \in \Xi$の関数として表現することができる．確率動的計画問題を解くためには，主問題に含まれる部分問題を逐次解くことが必要となる．**図5-3**には，アルゴリズムの概要を整理しているが，解法の手順は下記のように整理できる．

ステップ1： 最終期$\tau_0 = N$に着目する，終端条件として，すべての$\boldsymbol{\gamma}(N) \in \Xi$に対して$V^*(\boldsymbol{\gamma}(N)) = 0$, $W_i^*(N) = 0$と設定する．$\tau_0 = N - 1$として**ステップ2**へ進む．

ステップ2： 最適値関数$V(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0 + 1))$を与件とする．$\gamma_i(\tau_0) = 1$である$i$に関して，式(5.27a),(5.28a)を用いて$W_i^*(\tau_0)$を求める．

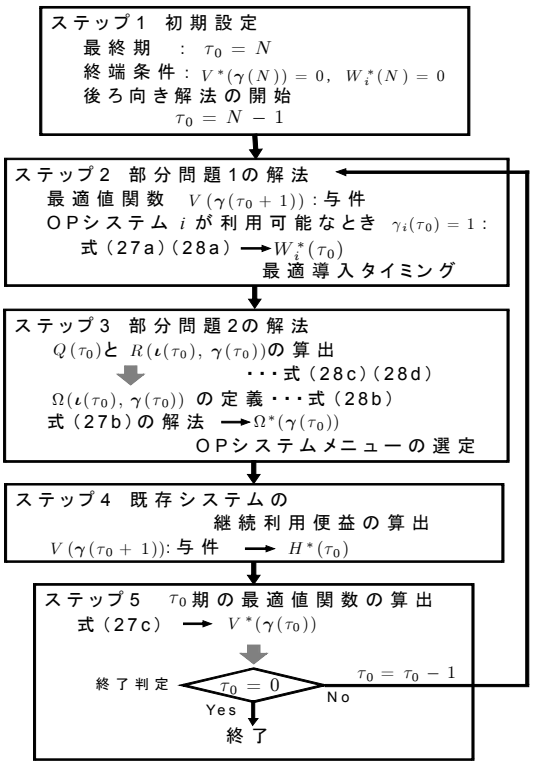


図 5-3 最適システム更新モデルの解法

ステップ3： 式(5.28c),(5.28d)を用いて$Q(\tau_0)$, $R(\boldsymbol{\iota}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$を求める．その上で，式(5.28b)を用いて，$\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)\in\Xi$に対して，$\Omega(\boldsymbol{\iota}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$を定義する．すべての$\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)$に対して問題(5.27b)を解き，$\Omega^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$を求める．

ステップ4： $\tau_0 + 1$に対して求めた最適値関数値$V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0 + 1))$を用いて，すべての$\boldsymbol{\gamma}(\tau_0) \in \Xi$に対して，$H^*(\tau_0)$を定義する．

ステップ5： 式(5.27c)より，最適値関数$V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$を求める．$\tau_0 = 0$であれば，アルゴリズムを終了する．そうでない場合，$\tau_0 = \tau_0 - 1$として，**ステップ2**へ戻る．

5.4.3 リアルオプション価値

本章では，情報システムの技術革新により，1) 情報システムの導入費用が低下するため，より安価に高性能の情報システムを導入できる，2) 新しい技術が開発されることにより，いままでにない新しいサブシステムを導入できるようになる場合を想定している．さらに，OPシステムの実用化時点に不確実性が存在するために，1) 更新時点を遅らせることにより発生する情報オプションと，2) 将来の拡張可能性を考慮することにより生じる拡張オプションが存在する．本節では，以上の2つのリアルオプション価値をモデル化する．

a) 情報オプション価値

時点τ_0において，情報システムの更新を見送り，意思決定を1期間留保することにより得られる便益である．最適システム更新問題(5.26)より，システム導入を1期間遅らせることにより得られる情報オプション価値は

$$\begin{aligned} &OP_{infor}(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) \\ &= \Omega^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) - H^*(\tau_0) \end{aligned} \tag{5.29}$$

と表される．最適システム更新問題の構造より，$OP_{infor}(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) < 0$が成立する場合，システムの更新を留保することが望ましい．

b) 拡張オプション価値

情報システムを更新した時点τ_0^*において，OPシステムメニューが$\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*)$に決定したと考える．OPシステムメニューに含まれるシステムの中には，実用化されることが確定していないシステムも存在する．OPシステムは，単独には効果を発揮せず，基幹システムに搭載されることにより，効果を発揮すると仮定する．したがって，OPシステムが実用化されれば基幹システムに搭載できるように，基幹システムに余剰容量を確保しておくことが必要となる．もちろん，目標年次までにシステムが実用化されなければ，必要以上の処理能力を維持するという非効率性が発生する．しかし，システムが実用化された段階で，システム接続の可能性が残されていなければ，システム導入により本来獲得できたOPシステムの便益を活用できないという機会費用が発生する．このように情報システムの拡張可能性を担保しておくことがもたらす経済価値を拡張オプション価値と呼ぶ．いま，1) すべてのOPシステムを搭載しない場合，2) OPシステムメニュー$\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*)$の中で，システム$i$のみを搭載しない場合を考える．これら2つのケースにおける基幹システムの更新費用を，それぞれ$C_0(\tau_0^*, \boldsymbol{\iota}_\phi(\tau_0^*))$, $C_0(\tau_0^*, \boldsymbol{\iota}^*_{-i}(\tau_0^*))$と表す．まず，OPシステムメニュー$\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*)$の搭載可能性を確保する拡張オプション価値$OP_e(\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*) : \boldsymbol{\gamma}(\tau_0^*))$は

$$\begin{aligned} &OP_e(\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*) : \boldsymbol{\gamma}(\tau_0^*)) \\ &= \sum_{i\in} R(\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0^*)) - \Delta C(\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*)) \end{aligned} \tag{5.30}$$

と表される．上式において，$\Delta C(\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*))$は，OPシステムメニュー$\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*)$の搭載可能性を確保するために必要となる追加的費用であり，

$$\begin{aligned} \Delta C(\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*)) &= C_0(\tau_0^*, \boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*)) \\ &- C_0(\tau_0^*, \boldsymbol{\iota}_\phi(\tau_0^*)) \end{aligned} \tag{5.31}$$

と定義される．つぎに，OP システム $i \in$ の搭載可能性を確保することにより獲得できる OP システム i の拡張オプション $OP_e^i(\boldsymbol{\iota}^*_{-i}(\tau_0^*) : \boldsymbol{\gamma}(\tau_0^*))$ を

$$\begin{aligned} &OP_e^i(\boldsymbol{\iota}^*_{-i}(\tau_0^*) : \boldsymbol{\gamma}(\tau_0^*)) \\ &= \sum_{t=\tau_0}^{T} \eta^{(t-\tau_0)} p_i(t : \tau_0) W_i^*(t) - \Delta C(\boldsymbol{\iota}^*_{-i}(\tau_0^*)) \end{aligned} \tag{5.32}$$

と定義する．ただし，$\Delta C(\boldsymbol{\iota}^*_{-i}(\tau_0^*))$ は，OP システム i を搭載するために必要となる追加的費用であり，

$$\Delta C(\boldsymbol{\iota}^*_{-i}(\tau_0^*)) = C_0(\tau_0^*, \boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*)) - C_0(\tau_0^*, \boldsymbol{\iota}^*_{-i}(\tau_0)) \tag{5.33}$$

と定義できる．情報システムの容量増加に関して，規模の経済性が存在する (容量増加の追加的費用が，情報システム容量が大きいほど減少する) 場合，

$$\begin{aligned} &OP_e(\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*) : \boldsymbol{\gamma}(\tau_0^*)) \\ &\geq \sum_{i \in \mathcal{H}(\boldsymbol{\iota}^*(\tau_0^*))} OP_e^i(\boldsymbol{\iota}^*_{-i}(\tau_0^*) : \boldsymbol{\gamma}(\tau_0^*)) \end{aligned} \tag{5.34}$$

が成立する．

5.4.4 適用事例

5.4.5 適用事例の概要

本章で提案した最適システム更新モデルを，中日本高速道路株式会社横浜支社が管理する交通情報システムの更新問題に適用する．同支社の交通情報システムは，現在基幹システムと 9 つのサブシステムにより構成されている．同システムは，1990 年に現在の交通情報システムに一括更新された．その後，基幹システムのみが，供用後 13 年経過した時点に，一度更新されている．いずれのシステムも前回の更新時から時間が経過しており，システムの陳腐化が進展している．それと同時に，現行のシステムを構成する機器や部品の老朽化が進展し，システムの故障確率が経年的に増加している．また，現行システムの機器・部品の在庫が乏しくなってきており，故障時における取替え費用や復旧時間が増加している．現行の交通情報システムは，東名高速道路の東京 IC〜三ヶ日 IC 間，小田原厚木道路，西湘バイパス，箱根新道，新湘南道路の範囲を対象として，交通情報の収集・提供を行っている．今後，第二東名高速道路の開通が計画されており，既存の交通情報システムに対する負荷の増大による処理能力の低下が懸念されることから，交通情報システムの合理的な更新政策の検討が求められている．以上の問題意識の下に，**4 章**において，現行システムの動的故障解析を行い，ライフサイクル費用の最小化やリスク影響度の観点から，基幹システムとサブシステムの更新・集約化を実施することが望ましいことを明らかにした．しかし，そこではライフサイクル費用，リスク影響度の観点から，既存システムの更新・集約政策の分析に留まっており，情報システム技術の陳腐化や情報システムがもたらす便益に関しては考慮していない．しかし，ドライバーの

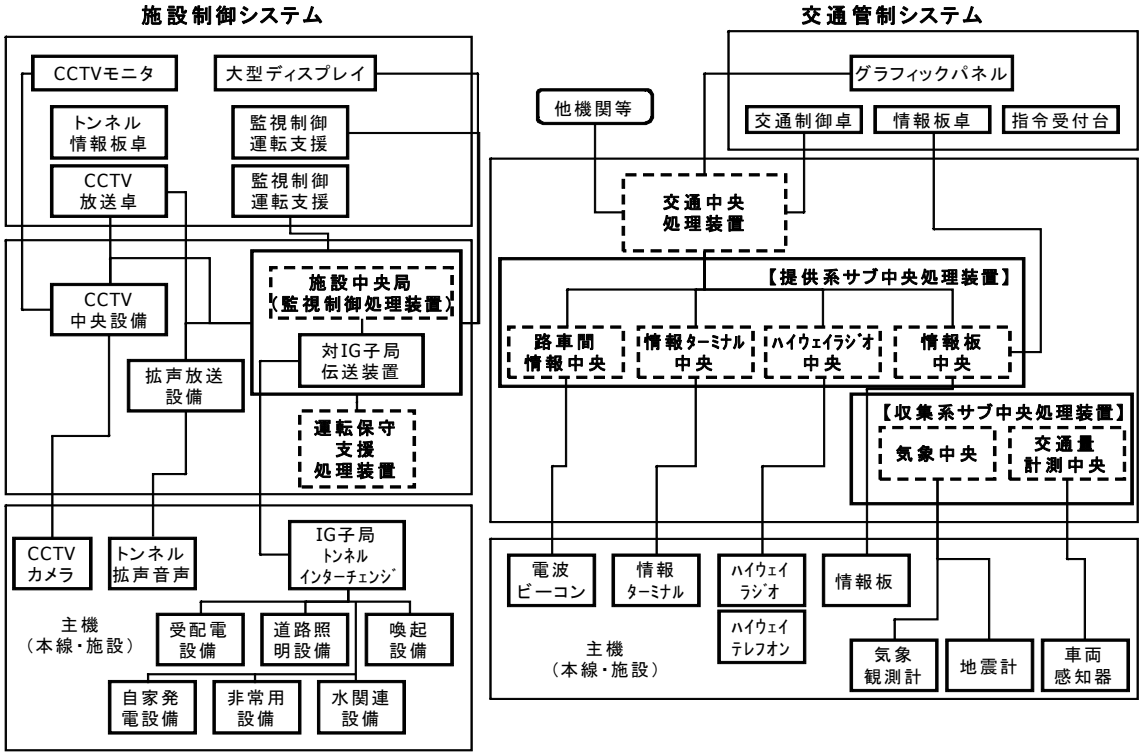


図 5-4　交通情報システム全体系統図

高速道路の交通機能サービスに関するニーズは多様化，高度化しており，様々な新しい交通機能サービスの導入が求められている．これらの交通機能サービスの中には，現時点で直ちに対応可能なものや，直ちに実現できないものの近い将来に実現可能なサービスも存在する．したがって，交通情報システムの更新・集約戦略を検討する場合，情報システムの高度化がもたらす利用者便益や新しい情報技術の利用可能性も考慮しながら，情報システムに搭載するシステムメニューや更新タイミングを決定することが必要となる．

現行の交通情報システムは，**図 5-4** に示すように施設制御システムや交通管制システムとそれを支える数多くのサブシステムで構成される．筆者等は，前章において，ライフサイクル費用，およびリスク影響度の観点から，これらのサブシステムを集約することが望ましいことを明らかにしている．本適用事例では，これら既存のサブシステムを新しい交通情報システムに集約することを前提として議論を進める．そこで，現行のサブシステムは，新しい交通情報システムを構成する FD システムと位置づける．

さらに，現行の情報システムには搭載されていないが，現時点，もしくは近い将来に搭載が可能となる新しいサブシステムとして，**表 5-1** に示すような 7 つの OP システムを考慮することとした．これら OP システムは現時点で直ちに導入可能ではないが，近い将来に実用化が可能なシステム技術を表している．中日本高速道路株式会社横浜支社では，交通情報システムの高度化の目標として，**表 5-2** に示すような交通

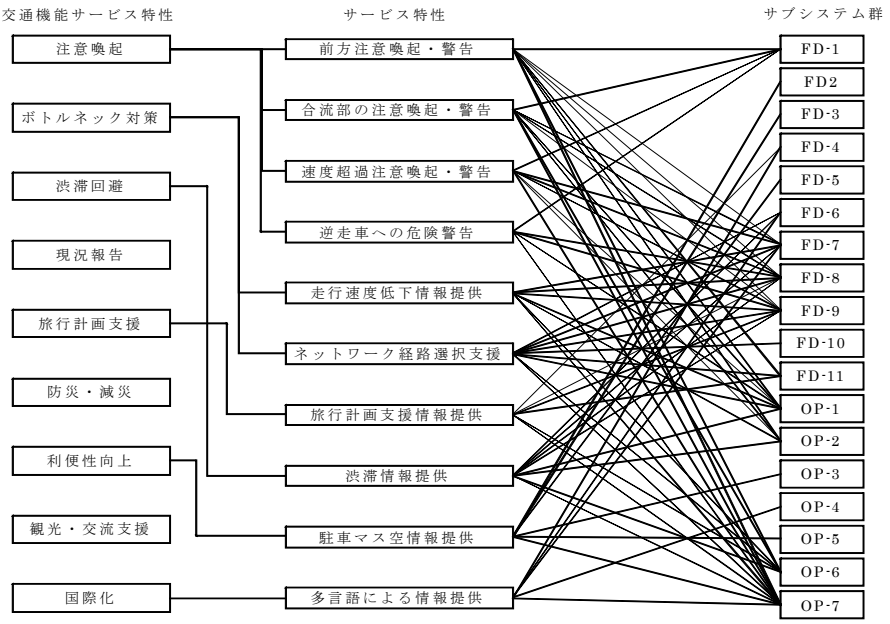


図 5-5 交通機能サービス特性とサブシステムの関係

機能サービス特性を掲げている．さらに，**表 5-1** に示した 11 個の FD システムと 7 個の OP システムの導入が，**表 5-2** に示した交通機能サービス特性の高度化にどのように貢献するかを**図 5-5** に示すように整理している．同図の右側の欄には，導入対象となるサブシステム群を示している．中央には，交通情報システムのフルセットメニューの導入により達成可能な詳細なサービス特性が示されている．

5.4.6 交通情報サービスに対するドライバーの認知構造

各サブシステムが提供する交通機能サービス特性の便益を CVM 手法 [21] を用いて計測した．その際，ドライバーが認知する交通情報システムの便益構造を把握するため，ドライバーの交通機能サービス特性に関する認知構造を共分散構造モデルで分析することとした．その上で，ドライバーの各交通機能サービス特性に対する支払い意思額 (willingness to pay) を CVM を用いて計測することにより，各サブシステムの導入便益を測定するという方法 [23] を採用した．

まず，ドライバーの交通情報システム導入に対する認知構造を把握するために，平成 19 年 12 月 15 日 (土)，海老名 SA，足柄 SA，牧之原 SA においてドライバー 533 人に対してヒアリング調査を実施した．ヒアリング調査では，1) ドライバーの年齢，使用している自動車の種類，性別，トリップの目的等のドライバーの特性，2) 交通機能サービス特性 (**表 5-2** に参照) に関する必要性，3) 交通情報システムの導入に対する支払い意思額について尋ねている．ドライバーに対するヒアリング調査では，**表 5-2** に示す交通機能サービス特性について調査員が詳細に説明を行った．**表 5-2** の左側の欄には，交通情報システムの交通機能サービス特性を列挙している．ヒアリング調査では，各ドライバーに，個々の交通機能サービス特性に対して，

種別		細目
基幹システム		交通中央局等※
FD	FD-1	テレビカメラ(交通流監視装置)を活用した警告システム
システム	FD-2	空き駐車マスへの誘導
	FD-3	LEDを用いた空き駐車マスへの誘導
	FD-4	次世代情報ターミナル
	FD-5	インターチェンジ・休憩施設における車両計測
	FD-6	ハイウェイラジオの連続化
	FD-7	高機能図形情報板
	FD-8	全線監視用テレビカメラ
	FD-9	画像処理技術の高度化
	FD-10	情報提供パターンの複数化
	FD-11	気象急変地域における情報提供・収集機器配置
OP	OP-1	ITS車載器を活用した警告
システム	OP-2	ETC車載器を活用した警告
	OP-3	ETSを活用した休憩施設の情報収集・提供
	OP-4	予測情報(渋滞伸縮・通行止め解除見込み)の提供
	OP-5	移動式カメラの開発OP-6ETC車載器, ITS車載器情報を活用した予測旅行時間計測 OP-7八王子支社の集約※基幹システムは, 交通中央局のほか, 情報板中央局, ハイウェイラジオ中央局, 情報ターミナル中央局, トラカン中央局, 気象中央局から構成され
	OP-6	ETC車載器, ITS車載器情報を活用した予測旅行時間計測
	OP-7	八王子支社の集約

表 5-1 サブシステム・メニュー
※基幹システムは，交通中央局のほか，情報板中央局，ハイウェイラジオ中央局，情報ターミナル中央局，トラカン中央局，気象中央局から構成される．

「1) 必要である」,「2) やや必要」,「3) どちらでもない」,「4) やや必要である」,「5) 必要でない」という5個のカテゴリがなかから1つを選択して頂いた．

以上のヒアリング調査結果に基づいて，共分散構造モデルの1つであるMIMICモデル (Multiple Indicator Multiple Cause Model) [22] を用いて，ドライバーの交通機能サービス特性に対する認知構造をモデル化した．MIMICモデルでは，複数の観測変数によって構成概念 (潜在変数) が規定され，その構成概念が複数の観測変数の原因となっていると考える．構成概念は実際には観測されないが，観測変数間に相関をもたらす潜在的な共通原因を表している．本章では，交通機能サービス特性の必要性に基づいてドライバーの認知構造を分析している．したがって，構成概念はドライバーが認知する交通機能サービス特性の必要性を集約的に表現したものであり，多様な交通機能サービス特性を提供するOPシステムの便益を構成概念を用いて総合的に表現していると考えることができる．いま，ドライバーの属性を表す変数をサイズ $(n_x \times 1)$ の列ベクトル $\boldsymbol{x}' = (x^1, \cdots, x^{n_x})$，交通機能サービス特性に対する回答をサイズ $(n_y \times 1)$ の列ベクトル $\boldsymbol{y}' = (y^1, \cdots, y^{n_y})$ を用いて表現する.「$\prime$」は，転置ベクトルであることを表している．ここで，期待値を$\mathbf{o}$に規準化した観測変数ベクトル

$$\boldsymbol{z}_x = \boldsymbol{x} - \boldsymbol{\mu}_x \tag{5.35a}$$

$$\boldsymbol{z}_y = \boldsymbol{y} - \boldsymbol{\mu}_y \tag{5.35b}$$

を定義する．ただし，$\boldsymbol{\mu}_x$は，観測変数ベクトル$\boldsymbol{x}$の期待値列ベクトル，$\boldsymbol{\mu}_y$は，観測変数ベクトル$\boldsymbol{y}$の期待値列ベクトルである．ここで，$\boldsymbol{z}_x$および$\boldsymbol{z}_y$の期待値は$\mathbf{o}$である．ドライバーの構成概念をサイズ $(n_\eta \times 1)$

特性	内容
注意喚起 (7. 40)	渋滞や事故が多発する箇所の手前の本線に道路情報板やハイウェイラジオ等を増設し，ドライバーに注意喚起を行うことにより，渋滞末尾車両への追突や2次的事故の発生を防止する.
ボトルネ (4. 86)	渋滞が多発する箇所の手前に道路情報板ック対策やハイウェイラジオ等を設置し，走行速度が低下している車両のドライバーへ速度を上げるように注意喚起を行うことにより，交通情報の発生を防止する.
渋滞回避 (4. 86)	渋滞回避JCTやインターチェンジ手前に道路情報板やハイウェイラジオ等を設置し，ドライバーへ他路線あるいは一般道を経由した場合の主要地点までの所用時間を提供することにより，渋滞を回避して頂くとともに，渋滞長の延伸を抑制する.
現況報告 (7. 27)	渋滞多発箇所に道路情報板やハイウェイラジオ等を設置し，渋滞に巻き込まれたドライバーに所要時間情報や渋滞長等をきめ細かく提供することにより，不快感を緩和す
旅行計画支援 (0. 59)	出発前のドライバーに他路線あるいは一般道を経由した場合の主要地点までの所用時間を携帯電話サイトより提供することにより，渋滞を回避して頂くとともに，渋滞長の延伸を抑制する.
防災・減災 (1. 67)	気象庁から提供される緊急地震速報情報等をサービスエリアで提供することにより，大規模地震の発生によるお客様の事故を防止する.
利便性向上 (7. 74)	行楽情報・ニュース等の各種情報を提供したり，インターネット接続環境を提供することにより，サービスエリアの利便性を向上する.
観光・交流 (20. 14)	観光情報等の提供や既存のIC間に出入口支援を設置することにより周辺地域へのアクセスを可能にする.
国際化 (14. 12)	外国人ドライバーが把握できる多言語の情報提供を行うことにより，国際化による活力の向上を図る.

表 5-2 交通機能サービス特性

注) (・)内の数字はドライバーの１トリップ当たりの支払い意思額（円/回）を表す.

の列ベクトル$\boldsymbol{\eta}' = (\eta^1, \cdots, \eta^{n_\eta})$で表す．潜在変数の期待値は0，分散は1に規準化している．

次に，構造変数ベクトルを$\boldsymbol{t}$と表す．ただし，$\boldsymbol{t}' = [\boldsymbol{\eta}', \boldsymbol{z}_x', \boldsymbol{z}_y']$である．また，$\boldsymbol{u}' = [\boldsymbol{\zeta}', \boldsymbol{d}', \boldsymbol{e}']$は残差ベクトルであり，$\boldsymbol{\zeta}$, $\boldsymbol{d}$, $\boldsymbol{e}$は，それぞれ，構造変数ベクトル$\boldsymbol{\eta}$, $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{y}$に対応する残差ベクトルを表す．このとき，ドライバーの認知構造を表す共分散構造モデルは，

$$\boldsymbol{t} = \boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{t} + \boldsymbol{u} \tag{5.36}$$

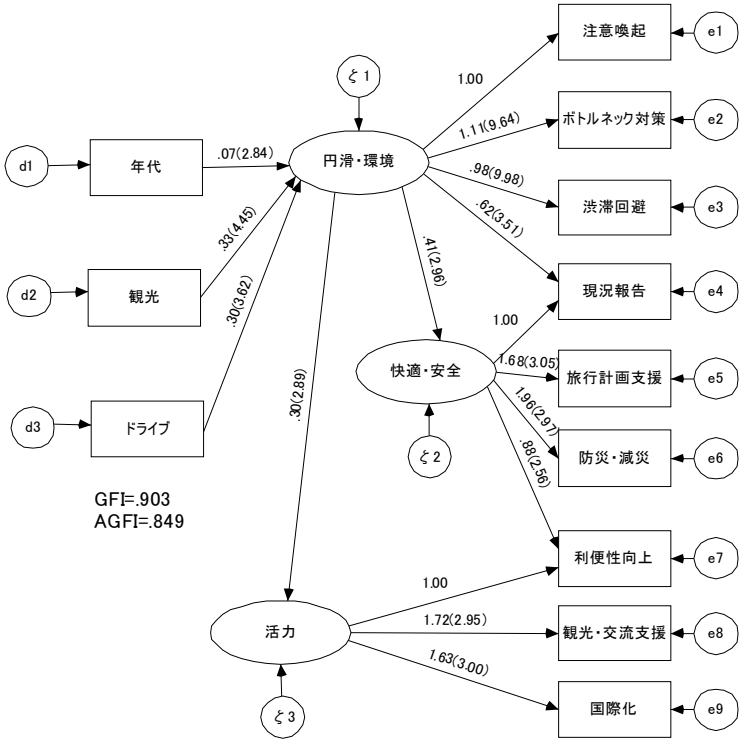
のように表現できる．ここに，$\boldsymbol{\Theta}$は構造変数間の関係を示す係数行列である．MIMICモデルでは，構成概念から構成概念への係数および観測変数から観測変数への係数はゼロであるので，係数行列$\boldsymbol{\Theta}$は，

$$\boldsymbol{\Theta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{O} & \boldsymbol{\Theta}_d & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{\Theta}_b & \boldsymbol{O} & \boldsymbol{O} \end{bmatrix} \tag{5.37}$$

と表される．ただし，$\boldsymbol{\Theta}_d$は，ドライバーの属性ベクトルが構成概念ベクトルに与える影響を表す係数行列を，$\boldsymbol{\Theta}_b$は，構成概念ベクトルが交通機能サービス特性ベクトルに与える影響を表す係数行列である．パラメータベクトルを構成するパラメータは，残差ベクトルの分散及び共分散を用いて表現できる．逆行列$\boldsymbol{T} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{\Theta})^{-1}$の存在を仮定すれば，式(5.36)を，

$$\boldsymbol{t} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{u} \tag{5.38}$$

と書き換えることができる．ここで，ゼロ行列と単位行列を横に並べたサイズ$(n_x + n_y) \times (n_f + n_x + n_y)$



注) 矢印に付随している数字は係数の推計値，括弧内の数字はt-値を表す.

図 5-6 ドライバーの認識構造

の矩形の定数行列$\boldsymbol{G} = [\boldsymbol{O},\ \boldsymbol{I}]$を定義すれば,

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{GTu} \tag{5.39}$$

となる．ただし，$\boldsymbol{v}$は，期待値0で規準化された観測変数で構成された観測変数ベクトル，すなわち$\boldsymbol{v}' = [\boldsymbol{z}_x', \boldsymbol{z}_y']$である．また，構成概念$\boldsymbol{\eta}$は

$$\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\Gamma Tu} \tag{5.40}$$

と表現できる．ただし，$\boldsymbol{\Gamma}$は，ゼロ行列と単位行列とゼロ行列を横に並べたサイズ$(n_f) \times (n_f + n_x + n_y)$の矩形の定数行列$\boldsymbol{\Gamma} = [\boldsymbol{I},\ \boldsymbol{O}]$である．ここで，MIMICモデルにおける未知パラメータ行列の非ゼロパラメータを一列に並べたパラメータベクトルを$\boldsymbol{\theta}$と表す．また，観測変数ベクトルを$\boldsymbol{w} = [\boldsymbol{x}', \boldsymbol{y}']$，観測変数の期待値で構成したベクトルを$\boldsymbol{\mu}' = [\boldsymbol{\mu}_x', \boldsymbol{\mu}_y']$と表現する．このとき，観測変数の共分散構造は，次式で表される.

$$\boldsymbol{\Sigma} = E[(\boldsymbol{w} - \boldsymbol{\mu})(\boldsymbol{w} - \boldsymbol{\mu})']$$

$$
\begin{aligned}
&= E[\boldsymbol{v}\boldsymbol{v}'] \\
&= E[\boldsymbol{G}\boldsymbol{T}\boldsymbol{u}(\boldsymbol{G}\boldsymbol{T}\boldsymbol{u})'] \\
&= \boldsymbol{G}\boldsymbol{T}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{T}'\boldsymbol{G}'
\end{aligned} \tag{5.41}
$$

ただし，観測変数の共分散行列$\boldsymbol{\Sigma} = \boldsymbol{u}\boldsymbol{u}'$は，パラメータ$\boldsymbol{\theta}$を用いて構造化されていることを明示的に示すために，$\boldsymbol{\Sigma}$を$\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})$と表記する．構造方程式モデルでは，観測変数$\boldsymbol{w}$が多変量正規分布にしたがっているものと仮定する．いま，家計iのデータ (観測変数) $\bar{\boldsymbol{w}}_i = [\bar{\boldsymbol{x}}_i, \bar{\boldsymbol{y}}_i]$が利用可能であると考える．パラメータ$\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}$を所与として，観測変数の組$\bar{\boldsymbol{w}}_i = [\bar{\boldsymbol{x}}_i, \bar{\boldsymbol{y}}_i]$が観測される確率は，

$$
\begin{aligned}
f(\bar{\boldsymbol{w}}_i|\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}) = (2\pi)^{\frac{-n}{2}} |\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})|^{-\frac{1}{2}} \\
\exp\left[-\frac{1}{2}(\bar{\boldsymbol{w}}_i - \boldsymbol{\mu})'\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1}(\bar{\boldsymbol{w}}_i - \boldsymbol{\mu})\right]
\end{aligned} \tag{5.42}
$$

と表される．$\boldsymbol{\mu}$は，サイズ$(n_x + n_y) \times 1$の観測変数$\boldsymbol{w}$の期待値ベクトルを表す．このとき，すべての観測変数の組$\bar{\boldsymbol{w}} = \{\bar{\boldsymbol{w}}_i \ (i = 1, \cdots, I)\}$が同時に生起する確率密度関数 (尤度関数) は

$$
\mathcal{L}(\bar{\boldsymbol{w}}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^{I} f(\bar{\boldsymbol{w}}_i|\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}) \tag{5.43}
$$

と表せる．対数尤度関数は，

$$
\begin{aligned}
\ln[\mathcal{L}(\bar{\boldsymbol{w}}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta})] &= \sum_{i=1}^{I} \ln f(\bar{\boldsymbol{w}}_i|\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}) \\
&= \frac{N}{2} \ln \left|\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1}\right| \\
&\quad - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{I}(\bar{\boldsymbol{w}}_i - \boldsymbol{\mu})'\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1}(\bar{\boldsymbol{w}}_i - \boldsymbol{\mu}) \\
&\quad + \text{パラメータのない項}
\end{aligned} \tag{5.44}
$$

となる．若干の計算の結果，最尤推定法のための目的関数 (適合度関数) は，

$$
f_{ML} = -\mathrm{tr}(\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1}\boldsymbol{S}) + \log|\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1}| \tag{5.45}
$$

のように変形できる．ただし，記号trは対角和，$\boldsymbol{S}$は，標本分散行列であり．

$$
\boldsymbol{S} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{I}(\bar{\boldsymbol{w}}_i - \hat{\boldsymbol{w}})(\bar{\boldsymbol{w}}_i - \hat{\boldsymbol{w}})' \tag{5.46}
$$

と定義される．$\hat{\boldsymbol{w}}$は，$\boldsymbol{w}_i$に関する標本平均である．式(5.45)を最大にするようなパラメータ値$\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \cdots, \theta_S)$の最尤推定量は，

$$
\frac{\partial f_{ML}}{\partial \theta_s} = 0 \ for \ all \ \theta_s \tag{5.47}
$$

を同時に満足するようなパラメータ$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\hat{\theta}_1, \cdots, \hat{\theta}_S)$として与えられる．ただし，$\theta_s \ (s = 1, \cdots, S)$は，パラメータベクトル$\boldsymbol{\theta}$の各要素を示す．

MIMICモデルの作成にあたっては，ドライバーの認知構造を表す因果パスモデルを網羅的に作成し，各モデルの推計精度を検討しながら最終的なモデル構造を確定することが必要となる．このような認知構造の確定作業の効率化を達成するため，因果パスモデルの作成に先立って，ドライバーの交通機能サービス特性に対する必要度判定の結果に対して因子分析を実施することにより，交通機能サービス特性が，1) 円滑・環境，2) 快適・安全，3) 活力の3つの因子に集約されることを確認した．その上で，MIMICモデル案を代替的に作成するとともに，個別のパスに関する符号条件や$t-$値，また修正適合度指標AGFI(Adjusted Goodness of Fit Index)を考慮して，もっとも推計精度が高くなるような変数とモデル構造を最終的に選択した．その結果，**図5-6**に示すようなMIMICモデルが，最終的に選択された．同図中には，各パラメータ値および対応するt値が記載されている．これより，すべての変数に対してt値は2.0以上であり，有意水準95%で説明変数の説明力を保証できる．

5.4.7 支払い意思額の推計

以上で推計した構成変数を用いて，ドライバーの交通機能サービス特性に対する支払い意思額を生存分析[21]を用いて推計した．支払い意思額に関するアンケート調査では，**図5-7**に示すようなアンケートシートを作成し，ドライバーの交通情報システム導入に対するWTP (willingness to pay; 支払い意思額) を尋ねた．その際，**表5-3**に示した3種類の金額提示による2段階2肢選択方式 (double-bounded dichotomous choice) を採用している．ここで，被験者iの支払い意思額T_iが，ワイブル関数

$$G(T_i) = 1 - \exp(-\nu_i T_i^{\alpha}) \tag{5.48}$$

に従って分布すると考える．ここで，αはスケールパラメータ，ν_iは，被験者iの位置パラメータである．この時，2回の提示額に対してそれぞれの回答$(k,j),(k,j=「Yes」,「No」)$が選択される確率$\Pr[k/j]$は，

$$\Pr[Yes/Yes] = \pi_i^{yy} = 1 - G(T_i^U) \tag{5.49a}$$

$$\Pr[Yes/No] = \pi_i^{yn} = G(T_i^U) - G(T_i^1) \tag{5.49b}$$

$$\Pr[No/Yes] = \pi_i^{ny} = G(T_i^1) - G(T_i^L) \tag{5.49c}$$

$$\Pr[No/No] = \pi_i^{nn} = G(T_i^L) \tag{5.49d}$$

と表すことができる．ただし，T_i^1は被験者iに対する第1回目の提示額，T_i^G, T_i^Lは第2回目の提示額（**図5-7**参照）を表す．さらに，MIMICモデルの構成変数を用いて，被験者iの位置パラメータを

$$\nu_i = \beta_0 + \beta_1 x_i^1 + \beta_2 x_i^2 + \beta_3 x_i^3 \tag{5.50}$$

と表す．ここに，$\beta_j (j = 0, \cdots, 3)$は未知パラメータ，$x_i^1$,$x_i^2$,$x_i^3$は，それぞれMIMICモデルを用いて評価した高速道路利用者iの構成変数1〜3の推計値である．以下，式(5.50)で表される支払い意思額関数をモデ

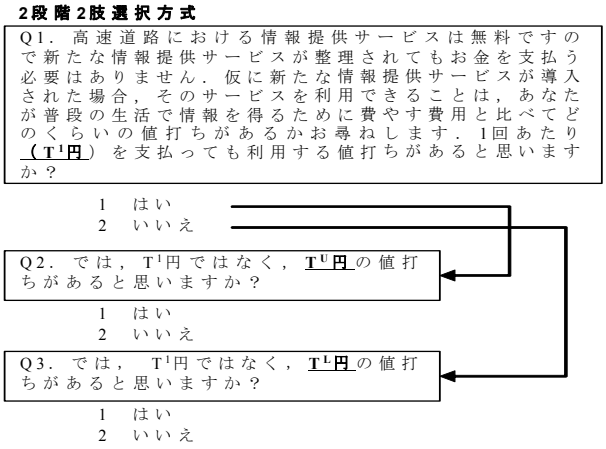


図 5-7 CVM 調査票

表 5-3 CVM 提示額 (単位：円)

バージョン	T_i^1	T_i^U	T_i^L
A	100	200	50
B	200	300	100
C	300	500	100

注) T_i^1：最初の提示額，T_i^U：賛成と答えた場合の2回目の提示額，T_i^L：反対と答えた場合の2回目の提示額

ル1と呼ぶこととする．この時，支払い意思額関数のパラメータは，対数尤度関数

$$\ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^{N} \{ d_i^{yy} \ln \pi_i^{yy} + d_i^{yn} \ln \pi_i^{yn} + d_i^{ny} \ln \pi_i^{ny} + d_i^{nn} \ln \pi_i^{nn} \} \tag{5.51}$$

を最大にするような$\hat{\alpha}, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3$として求まる．ただし，$d_i^{yy}$は被験者$i$が2回とも賛成と答えたときに1，それ以外のときは0となるダミー変数であり，d_i^{yn}，d_i^{ny}，d_i^{nn}もそれぞれ同様のダミー変数である．Nはサンプル数を示す．

2段階2肢選択方式による3種類のCVM調査票を作成し，合計533サンプルの有効回答を得た．支払い意思額モデルを推計した結果を**表 5-3**に示す．各構成変数に対応する説明変数の推計精度を表すt−値が1.96以上であれば，有意水準95%で説明変数の説明力を保証できる．しかし，モデル1では，円滑・環境β_1，快適・安全β_3についての仮説検定では，帰無仮説$\beta_1 = 0$及び$\beta_2 = 0$を棄却できず，支払い意思額関数モデルに対する説明力を確保できない．そこで，新たに$\beta_1 = \beta_2 = 0$としたワイブル関数の位置パラメータν_iを，

$$\nu_i = \beta_0 + \beta_3 x_i^3 \tag{5.52}$$

と定式化した（以下，モデル2と呼ぶ）．モデル2の推計結果を**表 5-3**に併記している．モデル2におけるパラメータの推定値はいずれも説明力を有している．このようにモデル2では，構成変数x_3^iのみが取上げられており，他の構成変数x_1^i, x_2^iはドライバーの支払い意思額に対して有意な説明力を有していない．しかし，このことは構成変数x_1^i, x_2^iが支払い意思額に影響を及ぼさないことを意味しているわけではない．これ

表 5-4 支払い意思額モデルの推計結果

説明変数	モデル1		モデル2	
	推計値	$t-$値	推計値	$t-$値
定数項β_0	0.0656	4.55	0.0658	4.56
円滑・環境β_1	0.00791	0.615	-	-
快適・安全β_2	-0.0169	-0.868	-	-
活力β_3	-0.0622	-2.60	-0.0595	-3.73
α	0.597	14.43	0.596	14.43
対数尤度関数	-600.75		-601.16	
WTP平均値	118.9円		119.1円	
WTP中央値	51.9円		52.0円	

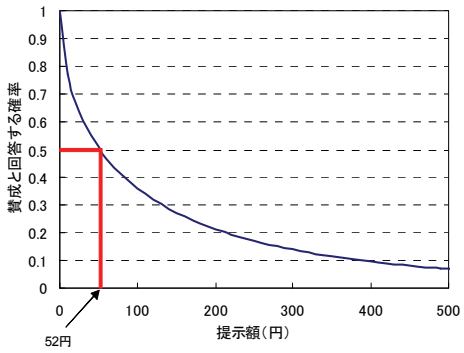


図 5-8 支払い意思額の推定結果

ら2つの構成変数は構成変数x_i^3に影響を及ぼすことにより，結果的にドライバーの支払い意思額に間接的に影響を及ぼすことになる．**図 5-8**は，支払い意思額の推定結果を用いて，各提示額に対して「賛成」と答える被験者の割合を表現したものである．支払い意思額の平均値は，**図 5-8**の生存関数の下側の面積に相当し，支払い意思額関数の推計結果を用いて，

$$E[WTP] = \int_0^{\overline{T}} \exp(-E[\nu]T^{\hat{\alpha}})dT \tag{5.53}$$

と定義できる．ただし，$E[\nu]$は全被験者の構成変数x_i^3の平均値を用いて，式(5.52)より算定した位置パラメータ値である．支払い意思額の平均値を算出する際の積分範囲の上限値$\overline{T}$は，最大提示額 (500円) で裾切りする．さらに，支払い意思額の中央値は，次式の確率pを0.5とすることで得られる．

$$WTP_{p=0.5} = \left\{ -\frac{1}{E[\nu]} \log(0.5) \right\}^{1/\hat{\alpha}} \tag{5.54}$$

以上により，すべてのFDシステム，OPシステムを同時に導入したような完全情報システムに対する支払い意思額の中央値 (WTP中央値) は，ドライバー1人あたり52.0円/台・トリップであることが判明した．しかし，最適システム更新戦略を求めるためには，完全情報システムに対する支払い意思額を個々のサブシステム (及び，その組み合わせ) の支払い意思額に分解することが必要となる．

サービス内容	重み	便益 A	サブシステム	重み	便益 B	利用者数 10^6人	補正係数 SAPA 立寄率	補正係数 ETC 普及率	補正係数 ITS 普及率	補正係数 その他	便益 C
前方注意喚起	0.5	3.7	OP-1	1.0	0.66	146	100%	100%	2%	100%	2.11
			OP-2	0.1	0.07	146	100%	73%	100%	100%	7.04
			FD-1	0.4	0.26	146	100%	100%	100%	100%	38.59
			FD-7	0.6	0.40	146	100%	100%	100%	100%	57.88
			FD-8	1.0	0.66	146	100%	100%	100%	100%	96.46
			OP-5	0.1	0.07	146	100%	100%	100%	100%	9.67
			FD-9	1.0	0.66	146	100%	100%	100%	100%	96.46
			OP-6	0.8	0.53	146	100%	100%	2%	100%	1.69
			FD-11	0.6	0.40	146	100%	100%	100%	100%	57.88
合流部の注意喚起	0.2	1.48	OP-1	1.0	0.30	146	100%	100%	2%	100%	0.95
			OP-2	0.2	0.06	146	100%	73%	100%	100%	6.31
			FD-1	0.4	0.12	146	100%	100%	100%	100%	17.29
			FD-7	0.6	0.18	146	100%	100%	100%	100%	25.93
			FD-8	1.0	0.30	146	100%	100%	100%	100%	43.22
			FD-9	1.0	0.30	146	100%	100%	100%	100%	43.22
			OP-6	0.8	0.24	146	100%	100%	2%	100%	0.76
速度超過注意喚起	0.1	7.4	OP-1	1.0	0.18	146	100%	100%	2%	100%	0.58
			OP-2	0.1	0.02	146	100%	73%	100%	100%	1.92
			FD-1	0.4	0.07	146	100%	100%	100%	100%	10.54
			FD-7	0.6	0.11	146	100%	100%	100%	100%	15.81
			FD-8	1.0	0.18	146	100%	100%	100%	100%	26.35
			FD-9	1.0	0.18	146	100%	100%	100%	100%	26.35
逆走車への危険警告	0.2	1.48	OP-1	1.0	0.42	146	100%	100%	2%	100%	1.35
			OP-2	0.1	0.04	146	100%	73%	100%	100%	4.51
			FD-1	0.4	0.17	146	100%	100%	100%	100%	24.69
			FD-8	1.0	0.42	146	100%	100%	100%	100%	61.74
			FD-9	1.0	0.42	146	100%	100%	100%	100%	61,74

表 5-5 サブシステムの経済便益 (一部)

注) **表 5-2** に示す9個の交通機能サービス特性の内，最初のサービス特性（注意喚起）を実現する各サブシステムの経済便益を計上した結果である.「注意喚起」という交通機能サービス特性は，さらに前方，合流部，速度超過，逆走車に対する注意喚起・警告という 4 つの詳細なサービス特性に分解できる．第 2 列は，各詳細サービスに対する重みを表し，第3列の便益 A は，各詳細サービスに対するドライバーの 1 トリップ当たりの便益（円/回）を表す．各詳細サービスは，第4列に示すサブシステムで実現されるが，第5列は各サブシステムが詳細サービスの実現に及ぼす貢献度を，第6列の便益 B は，各サブシステムが有する各詳細サービスに対するドライバーの 1 トリップ当たりの便益を表す．第7列は総交通量を表す．第8列から11列は，総交通量の中で当該のサブシステムのサービスを享受するドライバーの割合を補正する係数であり,「SAPA に立寄るか」,「ETC を利用しているか」,「ITS を利用しているか」，およびその他の要因による補正率を表している．1 つのサブシステムが複数のサービス特性の実現に貢献する場合もあるが，各サブシステムの総便益は，それらの複数のサービス特性に対する加算和で表現される．

MIMIC モデルを用いた共分散構造モデルでは，潜在変数の期待値を 0，分散を 1 に基準化しており，支払い意思額関数の平均値及び中央値を算出するために用いるワイブル関数の位置パラメータの平均値 $E[\nu]$ は，全被験者の構成変数 x_i^3 の平均値を 0 として求めることができる．つまり，完全情報システムの WTP 中央値は，全被験者の交通情報サービスに対する回答の平均値を構成概念の推計値としたものである．ここで，完全情報システムの WTP 中央値を個々のサブシステムの WTP へ分解するために，交通機能サービス特性 l $(l = 1, \cdots, n_y)$ に対して,「必要でない」と回答した場合の観測変数を用いて WTP 中央値を再推計し，完全情報システムの WTP 中央値との差分を，交通機能サービス特性 l の支払い意思額と定義する．ただし，交通機能サービス特性 l の便益を算出する際に機能 l 以外の観測変数は全被験者の平均値を用いる．つまり，交通機能サービス特性 l に対する支払い意思額 W_l は，交通機能サービス特性 l が「必要でない」と

システム	費用 (百万円)				瞬間価格	実現	便益
	総費用	導入費用	追加費用	維持費用	低減率	ハザード率	(百万円)
基幹システム	1,070	1,070	−	10,700	−	−	−
FD-1	50	50	−	0.5	−	−	234.1
FD-2	50	50	−	0.5	−	−	8.9
FD-3	50	50	−	0.5	−	−	1.3
FD-4	80	80	−	0.8	−	−	70.7
FD-5	20	20	−	0.20	−	−	282.5
FD-6	500	500	−	5.0	−	−	739.6
FD-7	200	200	−	2,0	−	−	1,109.0
FD-8	500	500	−	5.0	−	−	538.9
FD-9	500	500	−	5.0	−	−	538.9
FD-10	300	300	−	3.0	−	−	48.0
FD-11	500	500	−	5.0	−	−	107.1
OP-1	300	120	180	3.0	1.00	0.25	11.3
OP-2	300	120	180	3.0	1.00	0.25	36.5
OP-3	300	120	180	3.0	1.00	0.25	29.2
OP-4	300	120	180	3.0	1.25	0.25	48.0
OP-5	50	20	30	0.5	1.50	0.25	9.6
OP-6	300	120	180	3.0	1,33	0.33	7.9
OP-7	20	8	12	0.2	1.25	0.33	1,840.0

表 5-6 入力情報一覧

注) OP-7（八王子支社の基幹システムの統合）は，圏央道の供用時期の関係で不確実性を有しているため，OP システムとして取り扱う．OP システムの導入費用は基幹システムに拡張オプションを確保するために必要な費用を表し，追加費用は OP システムを追加的に搭載するために必要となる費用を表す．維持費用はシステムの故障を修理するために要する費用であり，その算定に当たっては筆者等が開発した故障解析モデル [20] を用いている．

回答した場合の観測変数から算出した位置パラメータν_lを用いて，

$$W_l = \log(0.5)^{1/\hat{\alpha}} \left\{ \left(-\frac{1}{E[\nu]} \right)^{1/\hat{\alpha}} - \left(-\frac{1}{\nu_l} \right)^{1/\hat{\alpha}} \right\} \tag{5.55}$$

と表せる．MIMIC モデルは線形システムで構成されており，交通情報システム全体に対する支払い意思額を，上式を用いて各交通機能サービス特性に対する支払い意思額として配分することが可能である．言い換えれば，交通情報システムの便益が，各交通機能サービス特性の便益の加算和として表現できることを前提としている．交通サービス機能の便益に重複部分がある（オーバラップ効果）がある場合や，交通機能サービス特性に相乗効果（シナジー効果）が存在する場合には，交通機能サービス特性の相互作用を考慮した複雑な MIMIC モデルを開発することが必要となる．この問題に関しては今後の課題としたい．

つぎに，交通機能サービス特性の支払い意思額W_l $(l = 1, \cdots, n_y)$からサブシステムの便益を算出する．交通機能サービス特性は，サブシステムの具体的な整備メニューの実現によってドライバーへ提供される．個々の整備メニュー（FD，OP システム）の実現によって交通機能サービス特性の提供に与える貢献度を寄与率で表現し，さらに各システムの年間の利用者数を，交通量及び SA，PA への立ち寄り率，ETC 及び

ITSの普及率により算出した補正係数によって，各サブシステムの総便益を算出する．サブシステムiの供用により発生する年間総便益u_iは，

$$u_i = \sum_{l=1}^{n_y} W_l \cdot \phi_{il} \cdot T \cdot \psi_i \tag{5.56}$$

と表される．ここで，ϕ_{il}は，サブシステムiの実現が交通機能サービス特性lの実現に対する貢献度，Tは年間交通量，ψ_iはサブシステムiに対して定義される補正係数である．なお，T，ψ_iは，中日本高速道路株式会社横浜支社の実績値を用いる．貢献度ϕ_{il}に関しては，利用可能な情報は存在しないが，同社において検討されたシステム開発コンセプトに基づいて設定した．以上の手順により，各サブシステムの便益を算定したが，検討のために用いた情報は膨大な量に及ぶ．ここでは，交通機能サービス特性の１つである「注意喚起」に対するドライバーの支払い意思額を，各サブシステムに配分する過程を示している．**表 5-2**に示すように,「注意喚起」に対するドライバー１トリップ当たりの経済便益は7.4円である．OP-7（八王子支社の基幹システムの統合）は，圏央道の供用時期の関係で不確実性を有しているため，OPシステムとして取り扱う．OPシステムの導入費用は基幹システムに拡張オプションを確保するために必要な費用を表し，追加費用はOPシステムの交通機能サービス特性に対する支払い意思額に基づいて，同様の方法で各サブシステムの便益を集計化できる．ここでは，紙面の都合上，その詳細については割愛する．

なお，本章で実施している検定手法においては式(5.51)中のη_i^1, η_i^2に推計誤差が含まれる．理論的厳密性を期すためには，構成変数の推計と支払意思額の推計を同時推計するか，もしくはtwo-step M -estimator[24]を用いて仮説検定を行う必要がある．本章で推計した構成変数x_i^1，x_i^2，x_i^3の分散は0.353, 0.0690, 0.1123であり，本研究で採用した簡便な方法でも，深刻な異質分散バイアスは発生しないと判断した．しかし，共分散はそれぞれ0.120, 0.170, 0.058であり，その値は大きくはないものの，構成変数の誤差相関による推計バイアスの問題が存在しないとは言えない．また，支払い意思額モデルの誤差項と構成変数の誤差項の相関が存在する可能性もあろう．さらに，事例によっては，異質性分散，誤差相関が存在する場合もあり，本研究で採用した簡便な方法を用いたときに推計バイアスが発生する可能性がある．このような説明変数の誤差分布の問題を回避するためには，MIMICモデルと支払い意思額モデルの同時推計の方法論を開発することが必要となる．

5.4.8 分析結果

表 5-6に，各サブシステムの導入費用，追加費用，維持費用を示している．基幹システムの導入費用は，現時点において基幹システムを更新するために必要となる費用を表す．また，各FDシステムの導入費用は，現時点で当該システムを基幹システムに追加搭載するために必要となる費用を表す．一方，OPシステムの導入費用は，現時点，もしくは将来時点において，当該システムを基幹システムに搭載するための容量を確保するために必要となる費用，追加費用は現実に当該OPシステムを追加搭載するために必要と

表 5-7 最適更新戦略とオプション価値

	搭載の有無	オプション価値	臨界スケール値
OP-1	×	－4100万円	2.2839
OP-2	○	3300万円	0.7071
OP-3	○	1000万円	0.8838
OP-4	○	7500万円	0.5118
OP-5	○	900万円	0.4134
OP-6	×	-4800万円	3.0396
OP-7	○	74,0800万円	0,0001

注) 搭載の有無の欄で○印がついているOPシステムは拡張オプションを確保することを，×印の場合は拡張オプションを確保しないことを意味する．

なる費用を表す．以上の費用データは，当該システムを生産する複数のメーカによる見積もり額の平均値を採用したものである．また，維持費用はシステムの故障を修理するために要する費用の現在価値であり，その算定に当たっては筆者等が開発した動的故障解析モデル[20]を用いている．実現確率は，それぞれ当該年度までに各OPシステムが実現する確率を表す．サブシステムの便益は，**5. (3)**に示した手順により，各サブシステムがもたらす便益の現在価値の総和を求めた結果を示している．

以上の入力情報を用いて，最適システム更新モデルにより求めた最適システム更新戦略を求めた．以下，本ケースをベンチマークケースと呼ぶ．ベンチマークケースでは，初期時点が基幹システムの最適更新タイミングとなった．さらに，OPシステムに関する最適更新戦略は**表 5-7**のように整理できる．すなわち，OPシステムの拡張オプションとしてOP-2(ETC車載器を活用した警告), OP-3(ETCを活用した休憩施設の情報収集，提供）, OP-4 (予測情報の提供), OP-5(移動式カメラの開発), OP-7(八王子支社の集約) を採用することが望ましいことが判明した．しかし，OP-1 (ITS車載器を活用した警告), OP-6 (ETC車載器，ITS車載器情報を活用した予測旅行時間計測) は拡張オプションとして確保しない結果となっている．**表 5-7**には，各OPシステムの拡張オプション価値を求めた結果も併記している．同表に示すように，OP-1とOP-6は，オプション価値が負となっており，これら2つのサブシステムの拡張オプションを確保する必要がないという結果になっている．また，基幹システムの更新を遅らせることにより獲得できる情報オプション価値$OP_{infor}(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$は0である．すなわち，ベンチマークケースでは，システムの最適更新時刻はすでに過ぎ去っており，できるだけ速やかに基幹システムを更新することが望まれる．その結果，システムの更新を延期することによって得られる追加便益は存在しない結果となっている．

以上で求めた最適システム更新戦略は，各サブシステムの便益の推計結果に依存している．特に，OPシステムは未実現のシステム技術であり，ドライバーが正確に便益を評価していない可能性も否定できない．そこで，OPシステムの便益f_iをシステム的に変化させ，最適システム更新戦略に変化が発生するかについて感度分析を試みた．OPシステムの便益を

$$\hat{f}_i = \kappa_i f_i \tag{5.57}$$

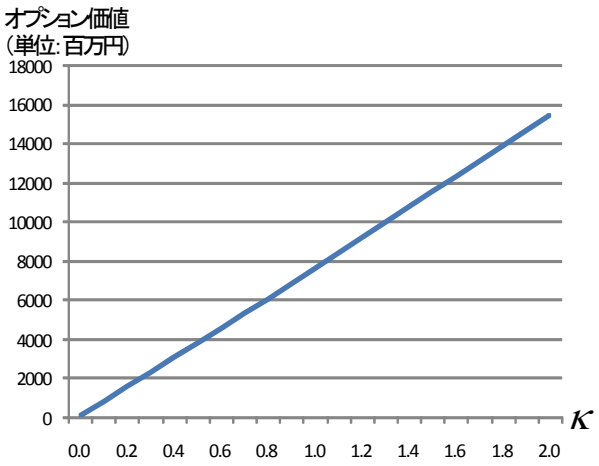


図 5-9 システム便益とオプション価値

と表現する．ただし，κ_iは，ベンチマークケースにおける便益 f_iに対して，どの程度便益が変化するかを表す比例的スケールパラメータである．**図 5-9** は，すべての OP システムのスケールパラメータκ_iが一律に変化することにより，システム全体のオプション価値がどのように変化するかを分析した結果を示している．同図に示すようにスケールパラメータκ_iを変化させることにより，システム全体のオプション価値は線形に変化している．ただし，いずれのケースでも，初期時点が最適システム更新時点として選ばれていることを断っておく．言い換えれば，FD システムのみを搭載する場合でも，初期時点が最適システム更新時点であることが理解できる． さらに，**図 5-10** は各 OP システムのスケールパラメータκ_iの変化と各 OP システムの拡張オプション価値の変化を分析した結果を示している．スケールパラメータκ_iの値が小さくなれば，拡張オプション価値は減少する．すなわち，各 OP システムの導入費用の低減割合が小さくなる．各 OP システムの導入費用が一定である限り，OP システムの便益が大きくなれば，拡張オプション価値は大きくなる．ベンチマークケースと比較してκ_3の値が 0.6 程度になれば，OP-3 の拡張オプション価値が負となり，OP-3 の拡張オプションを確保するメリットは喪失する．さらに，κ_2が 0.2 程度まで下がると OP-2 の拡張オプション価値が負となる．一方，OP-4, OP-5 は，感度分析の範囲内では拡張オプション価値が常に正となり，費用逓減率の多寡に関わらず，システムへの搭載が正当化される．なお，**図 5-10** では，OP-7 の拡張オプション価値の記載を割愛している．これは，OP-7 の拡張オプション価値が他のサブシステムのオプション価値より 100 倍程度大きい値を示しており，同一の図に掲載することが不可能なためである．つぎに，各サブシステムのオプション価値が 0 となるような臨界的なスケールパラメータ値（以下，臨界スケール値と呼ぶ）κ_i^*を定義する．各 OP システムの臨界スケール値を求めた結果を**表 5-7** に併記している．ベンチマークケースでは基幹システムへの搭載が見送られるた OP-1,OP-6 の臨界スケール

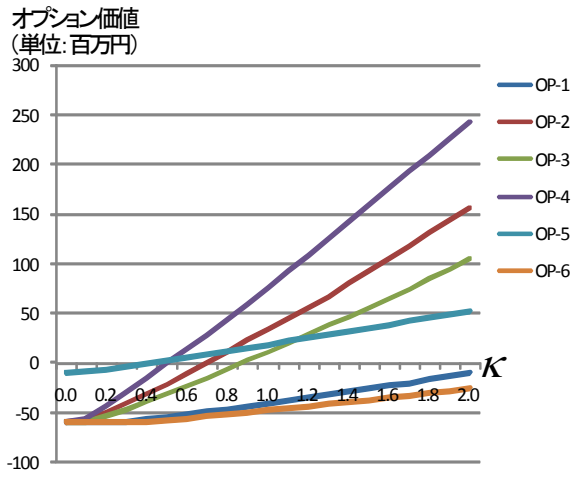


図 5-10　サブシステム便益とオプション価値

値は，それぞれ2.2839，3.0396となっている．言い換えれば，OP-1,OP-6の便益がベンチマークケースに対して3倍程度大きくならなければ，基幹システムに搭載することが困難であることを示唆している．逆に，残りのOPシステムは，ベンチマークケースよりも便益が低下しても基幹システムに搭載することが経済的に正当化される．特にOP-7の臨界スケール値は極めて小さい値0,0001をとっており，八王子支社の統合というオプションの経済価値は非常に大きいことが理解できる．

5.4.9　実用化への展望

本章では，交通管制システムの最適更新戦略を対象に進めてきたが，本章で提案したマネジメントモデルは，情報システムの規模等にかかわらず，技術的陳腐化と動的故障過程を有する全ての情報システムに適用できると考えられること，さらには，昨今の情報システム同様，技術的陳腐化を有するIT技術を活用した通信施設の最適更新戦略にも適用できると考えられるため，今後は，評価の対象とする情報システムや通信施設の現状調査等を行うことにより，様々な情報システム，通信施設の更新戦略に適用することが期待できる．

5.5　結言

本章では，技術的陳腐化を考慮した大規模情報システムの最適更新問題をとりあげた．その際，大規模情報システムが，基幹システムと複数のサブシステムで構成されると考える．その際，技術的陳腐化が，1) 情報システムの導入費用の低減，2) 新しいサブシステムの出現により，情報システムの技術的陳腐化が発生すると考えた．基幹システムの不可分性とサブシステム技術の実用化タイミングの不確実性に起因し

て，大規模情報システムの更新時機決定問題に，情報オプションと拡張オプションが存在することを明らかにした．このようなオプション価値を明示的に考慮し，期待純便益を最大にするような更新時点とサブシステムのメニューを決定するような最適更新モデルを定式化した．さらに，高速道路の大規模情報システムテムを対象とした実証分析を通じて，本章で提案した方法論の有効性を実証的に検証しえたと考えるが，今後の研究課題として以下の事項が残されている．第1に，本章では，新技術の実用化時点に関わらず，導入費用が一定であると仮定している．実用化時点により，それ以降の導入費用の経年的変化が依存する場合，本章で提案した最適更新モデルを拡張することにより対処できる．その場合，動学モデルの確率構造が飛躍的に複雑になるため，効率的な解法を開発することが必要となる．第2に，MIMICモデルの構成変数の誤差相関による推計バイアスの問題を解決する必要がある．支払い意思額モデルの誤差項と構成変数の誤差項の相関が存在する場合や異質性分散，誤差相関が存在する場合には，MIMICモデルと支払い意思額モデルの同時推計の方法論を開発することが必要となる．第3に，交通情報システム便益の計測方法の精緻化を図ることが必要である．利用者が新しい交通情報システムの経済便益を正確に認知することには困難である．このため，交通情報システムの導入効果を分析するためには，交通シミュレーションモデル等を用いた交通流解析による経済便益測の定方法を開発することが必要である．また，複数のサブシステムが同時に実現することによる便益のオーバーラップ効果，あるいはシナジー効果を計測する方法を開発することが必要である．最後に，本章では，情報システムの陳腐化を，最適システムと現有システムとの純便益の乖離により定義した．しかし，情報システムの陳腐化に対しては，より広範囲の視点から検討することが必要となる．たとえば，ドライバーの心理効果や宣伝効果等，技術開発誘導効果のように，経済的純便益以外にも，多くの側面から検討することが必要となると考える．

参考文献

[1] 徳井丞次，乾友彦，落合勝昭：資本のヴィンテージ，研究開発と生産性，宮川努編：失われた10年を超えて研究会報告書，pp.27-52，日本経済研究センター，2006．

[2] Solow, R.: Investment and technical progress, in Arrow, K., Karlin, S., and Suppes, P.(eds.): *Mathematical Methods in the Social Sciences*, pp.89-104, Stanford University Press, 1960.

[3] Jorgenson, D.W. and Griliches, Z.: The explanation of productivity change, *Review of Economic Studies*, Vol.34, pp.249-283, 1967.

[4] 野村浩二：資本の測定，慶應義塾大学出版会，2004.

[5] 国則守生：設備の償却率について，わが国建設機械の計測例，経済経営研究, Vol.9-3，日本開発銀行設備投資研究所, 1988.

[6] Gordon, R.J.: *The Measurement of Durable Good Prices*, University of Chicago Press, 1990.

[7] Hulten, C.: Growth accounting when technical change is embodied in capital, *American Economic Review*, Vol.82, pp.964-980, 1992.

[8] Bahk, B. and Gort, M.: Decomposing learning by doing in new plant, *Journal of Political Economy*, Vol.101, No.4, pp.561-583, 1993.

[9] Sakellaris, P. and Wilson, D.: Quantifying embodied technical change, *Review of Economic Dynamics*, Vol.52, No.2, pp.255-276, 2004.

[10] Romer, P.M.: Increasing returns and long-run growth, *Journal of Political Economy*, Vol.94, pp.1002-1037, 1986.

[11] Barro, R.J. and Sala-i-Martin, X.: *Economic Growth*, McGraw-Hill, 1995, 大住圭介訳：内生的経済成長理論，九州大学出版会，1997.

[12] Jones, C.I.: *Introduction to Economic Growth*, W.W. Norton & Company, Inc, 1998, 香西泰訳：経済成長理論入門，日本経済新聞社, 1999.

[13] Pindyck, R.S.: Irreversibility, uncertainty, and investment, *Journal of Economic Lirerature*, Vol.29, pp.1110-1148, 1991.

[14] Dixt, A.K. and Pindyck, R.S.: *Investment Under Uncertainty*, Princeton University Press, 1994.

[15] Trigeorgis, L.(ed.): *Real Options in Capital Investment: Models, Strategies, and Applications*, Praeger, 1995.

[16] Copeland, T. and Antikarov, V.: *Real Options*, Texere, 2001.

[17] Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.

[18] Gourieroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.

[19] 貝戸清之，山本浩司，小濱健吾，岡田貢一，小林潔司，2008，ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデル：大規模情報システムへの適用，土木学会論文集 F，Vol. 64, No. 2 pp.115-129.

[20] 山本浩司，青木一也，貝戸清之，小林潔司：劣化現象を考慮した大規模交通管制システムの動的故障解析，土木学会論文集 F，(登載決定).

[21] 例えば，栗山浩一：環境の価値と評価手法，北海道大学図書刊行会，1998.

[22] 例えば，豊田秀樹：共分散構造分析 [入門編]，朝倉書店，1998.

[23] 松島格也，湧川勝己，大西正光，伊藤弘之，小林潔司：水害による被災家計の精神的被害の経済評価，土木計画学研究・論文集，Vol.24, pp.263-272, 2007.

[24] Wooldridge, J.: *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*, The MIT press, 2002.

第6章

結論と課題

交通管制システムは，現行の業務処理の流れ，各業務の利用機能，処理の発生状況（件数等），問題点，改善課題，ニーズ等を踏まえ，既設システムの機能を追加開発，或いは新たな機能を有するサブシステムを次々に構築するといった対処療法が採用されてきた．交通管制システムの管理に係わる費用のなかでも大きなウェイトを占める項目の一つに設備の改造・更新がある．

しかし，このような改修を繰り返し，継ぎ接ぎだらけとなった交通管制システムは，業務効率の低下を招くとともに，システムの保守・運用を困難なものとしていた．特に，2007年前後に、日本の情報化を牽引したベテラン・エンジニアが一気に引退することに起因する「2007年問題」も事態を深刻にしており，近い将来，既設システムのプログラムの保守・運用が立ち行かなくなるのではと危惧されている．

交通管制システムに代表される情報システムの世界はモデルのライフサイクルが短く，且つ極めて多くの種類の機器で構成される複雑な構造を有しているから，システムの建設費，供用後の維持費と修繕費，更新費や，安全に関する被害，環境への被害を被害，経済性に関する被害，情報システムの技術的陳腐化と，情報システムの動的故障過程を同時に考慮に入れて，さらには，これらの数多くある個々のシステム・機器の最適化（再構築）も考慮した更新戦略を決定する必要がある．

しかし，これまでの研究事例における情報システムの最適更新戦略は，システムの物理的な劣化のみを考慮している程度であり，社会構造の変化，および使用環境等の変化に伴って生じる顧客が道路施設に求めるニーズ変化や，その結果生じる技術的陳腐化による更新戦略については，考慮されていないのが現状であった，また，従来の評価では，建設費と保全費に加えて，曖昧な耐用年数，および曖昧な許容故障率で管理しており，その曖昧さの妥当性を定量的に検討する必要があった．以上の問題意識の下に，本研究では，大規模交通管制システムを対象とした最適更新戦略に関する研究としてとりまとめた．

2章では，交通管制システムの建設費，供用後の維持費と修繕費，更新費の他，情報システムの技術的陳腐化，及びこれらの数多くある個々のシステム・機器の最適化（再構築）も考慮した更新戦略手法，及びその検討工程を，情報システムの最適更新戦略に向けた各種調査，評価モデル・システムの最適化（再構築）計画案作成工程と，検討されたシステムの最適化（再構築）計画案を定量的かつ客観的に評価する工程に大別したものを提案した．なお，後工程では，将来時点の維持費と修繕費，更新費の他，情報シス

テムの技術的陳腐化を予測し，最適な対策工法と対策時期を選定することにより情報システムの計画的かつ効率的な更新戦略を策定するアセットマネジメント評価プロセスとした．さらに，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を通じて，提案したシステム・機器の最適化（再構築）も考慮した更新戦略の実効性を確認した．

3章では，交通管制システムのような大規模情報システムのアセットマネジメントを実施する場合，情報システムの構造的，機能的な複雑性を考慮した検討が不可欠であることから，マネジメント手法の研究に先立ち，マネジメントレベルを機器レベル，システムレベル，機能レベルに分類するとともに，このうち，社会基盤施設を支援する大規模情報システムの機器レベルのアセットマネジメントを対象として，情報システムを構成する機器群の劣化故障予測モデルを提案した．その際，情報システムが，多数のタイプの機器で構成されることに着目し，タイプ間におけるハザード率の異質性を表現できるような故障解析モデルが必要であることを指摘した．このような故障率の異質性を操作的に表現するために，ワイブル劣化ハザードモデルをベースモデルとし，ハザード率の比例的異質性を標準ガンマ分布で表現したようなランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを定式化した．さらに，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を通じて，提案したハザードモデルの有効性を実証的に検証した．

4章では，社会基盤施設を支援する大規模情報システムのアセットマネジメントを対象として，情報システムの動的フォールト・ツリー分析モデルを提案した．そのために，情報システムの機器群の故障過程を，２．で研究したランダムワイブル劣化ハザードモデルで表現した．さらに，機器の故障により情報システム全体の故障が発生するメカニズムをフォールト・ツリーにより表現した．その上で，時間の経過に伴って変化する機器群の故障率の変化や，機器の復旧時間の変化が，情報システムの故障発生確率や，故障がもたらす影響度の時間的変化に及ぼす影響をモンテカルロ・シミュレーションにより分析する方法論を提案した．さらに，高速道路の交通管制システムを対象とした適用事例を通じて，提案したハザードモデルの有効性を実証的に検証した．

5章では，技術的陳腐化を考慮した大規模情報システムの最適更新問題をとりあげた．その際，大規模情報システムが，基盤システムと複数のサブシステムで構成されると考える．その際，技術的陳腐化が，1) 情報システムの導入費用の低減，2) 新しいサブシステムの出現により，情報システムの技術的陳腐化が発生すると考えた．基盤システムの不可分性とサブシステム技術の実用化タイミングの不確実性に起因して，大規模情報システムの更新時機決定問題に，情報オプションと拡張オプションが存在することを明らかにした．このようなオプション価値を明示的に考慮し，期待純便益を最大にするような更新時点とサブシステムのメニューを決定するような最適更新モデルを定式化した．さらに，高速道路の大規模情報システムテムを対象とした実証分析を通じて，本研究で提案した方法論の有効性を実証的に検証した．

以上が本研究の結論であるが，今後の研究課題として以下の事項が残されている．第１に，本研究では，新技術の実用化時点に関わらず，導入費用が一定であると仮定している．実用化時点により，それ以降の

導入費用の経年的変化が依存する場合，本研究で提案した最適更新モデルを拡張することにより対処できる．その場合，動学モデルの確率構造が飛躍的に複雑になるため，効率的な解法を開発することが必要となる．第2に，交通情報システム便益の計測方法の精緻化を図ることが必要である．本研究では，ドライバーの交通情報サービスに対する支払い意思額をCVM調査により計測している．しかし，利用者が新しい交通情報システムの経済便益を正確に認知することには困難である．このため，交通情報システムの導入効果を正確に測定するためには，交通シミュレーションモデル等を用いた交通流解析を通じて，交通流の円滑化がもたらす走行便益や交通事故の回避便益等を測定する方法を開発することが必要である．第3に，本研究では第二東名高速の供用開始時点や自動車交通量を外生的に与えるとともに，経済便益の不確実性がシステム更新戦略に及ぼす影響を感度分析により検討している．しかし，経済便益の不確実性はシステム更新政策に多大な影響を及ぼすため，経済便益リスクと技術的陳腐リスクという２つのリスクを同時に考慮したような最適システム更新モデルを開発することが必要である．最後に，本研究では，交通管制システムの最適更新戦略を対象に進めてきたが，本研究で提案したマネジメントモデルは，情報システムの規模等にかかわらず，技術的陳腐化と動的故障過程を有する全ての情報システムに適用できると考えられること，さらには，昨今の情報システム同様，技術的陳腐化を有するIT技術を活用した通信施設の最適更新戦略にも適用できると考えられるため，今後は，評価の対象とする情報システムや通信施設の現状調査等を行うことにより，様々な情報システム，通信施設の更新戦略に適用することが期待できる．

謝辞

本研究の遂行にあたり，多くの方々にご指導，ご鞭撻を賜りました．ここに心よりの感謝の意を表します．

まず，京都大学　小林潔司教授には，本研究の内容および方針について，終始，細やかなご指導，ご鞭撻を賜りました．思い起こせば2004年初頭，高速道路の道路付帯施設の改築，維持，修繕事業を，より経済的に，より効率的に遂行することに関して問題意識を持っていた筆者は，道路付帯施設のアセットマネジメントに関するご指導をお願いするために小林潔司教授を訪ね，それ以降，トンネル照明施設，消火施設をはじめとする道路付帯施設のアセットマネジメントから，高速道路休憩施設の整備効果分析まで，広範にわたって筆者をご指導いただきました．

本研究は，前述の道路付帯施設のアセットマネジメントに関する研究成果を礎に，技術的陳腐化を有する情報システムのマネジメントに関する研究を行ったもので，技術的陳腐化が発生することが文献等でも指摘されていたものの，技術的陳腐化に関する科学的・学術的なアプローチに関しては蓄積がない中，ベイズ理論に基づく統計的予測技術，及びリアルオプションによるプロジェクト評価等，様々な解決手法等について，きめ細やかなご指導を賜ったことにより，本研究を纏めることが出来ました．

京都大学　大津宏康教授及び河野広隆教授には，本論文のとりまとめに関して適切なご助言ならびに御指導を頂きました．

大阪大学　貝戸清之特任講師には，本研究にあたり，情報システムのアセットマネジメントの手法論の細部にわたりご助言ならびに御指導を頂きました．ここに，深く感謝いたします．

京都大学　松島格也准教授には，情報システムの便益を計測する手法，並びに情報サービスに対するドライバーの認知構造を共分散構造モデルで表現する手法について，ご指導いただきました．京都大学　大西正光助教には，筆者の研究生活の多くを支えていただきました．心より感謝いたします．

本研究は，これまで2年間に亘って行われた，大規模交通管制システム整備計画検討会での研究成果が論文の根幹を形成しております．国立情報学研究所　浅野正一郎教授には，交通管制システムに代表される情報システムの世界における情報システムの最適化手法，並びにアーキテクチャの構築方法，並びににについてご指導いただきました．また，成澤徹氏，熊崎隆行氏（財団法人高速道路技術センター），赤坂俊幸（株式会社高速道路総合技術研究所），青木一也氏，岡田貢一氏（株式会社パスコ），小林隆（中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社），井上正典氏，鷲見護氏（株式会社ドーシス），吉川和利氏（中

日本高速道路株式会社），伊藤芳彦氏，浅野泰史氏，大角知生氏（株式会社三菱総合研究所）をはじめとする検討会の皆様には，終始活発な論議により大規模交通管制システムの最適更新戦略に関しての貴重な意見を頂戴しました．この検討会なくしては，本論文の完成はあり得ませんでした．ここに深く感謝いたします．さらに，青木一也氏には，情報サービスの便益計測にあたって共に研究に取り組み，本研究の遂行に多大な貢献を頂きました．

筆者が本研究を始めるきっかけとなったのは，中日本高速道路株式会社で建設が進められている第二東名高速道路の情報提供サービスを担う大規模情報システムの最適更新計画に関する研究を，会社のビジョンとして位置付け，本研究の機会を与えてくださった中日本高速道路株式会社　吉川良一横浜支社長，ならびに佐藤文昭氏，軍記伸一氏，尾上浩司氏に深く感謝いたします．さらには，本研究活動に多大なるご指導とご支援を頂いた藤田友一郎氏，江口傑，他関係者一同に深く感謝いたします．

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻計画マネジメント論研究室の皆様には，本研究を取り纏める上で多大なるご協力を頂きました．博士課程　小濱健吾氏には，大規模情報システムへのランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルの適用にあたって共に取り組み，本研究の遂行に多大な貢献を頂きました．修士課程　菱田憲輔氏には，中日本高速道路株式会社で開催した大規模交通管制システム整備計画検討会にも参加いただき，大規模情報システムの社会経済的，技術的な陳腐化を考慮した最適システム更新モデルを定式化にあたって共に研究に取り組み，本研究の遂行に多大な貢献を頂きました．両氏の協力なくして本論文の完成はありません．また，秘書の藤本彩氏には，研究活動生活を支えていただきました．心より感謝いたします．

最後に，筆者の研究活動に対して多大なる応援と励ましをいただいた父親及び他界した母親に感謝の意を表示します．

2008年7月

山本浩司