

故障シミュレーションと遺伝的アルゴリズムによる 設備保守計画の最適化

Failure Simulation and Genetic Algorithm Approach to Optimize Maintenance Schedule

鉄道、電力、航空会社などでは、設備の故障が発生すると復旧作業や利用者への補償に多額のコストが必要となる。このため必要以上に定期保守が実施される傾向にあった。しかし近年の不況からコストの削減が求められ、適正な定期保守の実施が望まれている。そこで不確実性下の保守コストとリスクの定量的評価と、評価をもとにした保守計画最適化の研究を実施した。本研究では保守計画のコストとリスクの評価にモンテカルロシミュレーションを用いた。設備の故障をワイブル分布によってシミュレートした。また、保守計画の最適化には遺伝的アルゴリズムを用いた。

鉄道会社のデータをもとに作成したテストデータによる評価で、本研究で提案する保守計画立案手法が優れた計画を立案することを確認した。

山崎 伸晃 Yamazaki Nobuaki
手塚 大 Tezuka Masaru

1 はじめに

鉄道や電力会社などは業務上多数の設備を取り扱っている。鉄道や電力会社などの取り扱う設備は、設備の故障によって復旧作業や利用者への補償に多額の緊急保守コストが発生する。一般に、定期保守コストと比較して緊急保守コストは多額の費用が発生するため、鉄道や電力会社などでは、故障回避を目的として、必要以上に定期保守を実施する傾向にあった。しかし、近年の不況の影響を受けて、コストの削減が求められ、適正な定期保守の実施が望まれている。

本研究では、設備の故障の不確実性を反映させるために、モンテカルロシミュレーション¹⁾を用いることで、総保守コスト(定期保守コスト+緊急保守コスト)の不確実性を定量的に評価した。また、遺伝的アルゴリズム²⁾を用いて、総保守コストが最小となる設備保守計画を立案した。

2 設備保守計画

設備保守計画とは、故障がなるべく発生しないように多数の設備を保守する日時を決定する問題である。一般にある定期保守日から次回の定期保守日までの保守間隔を延長すると、保守する回数は減少し、定期保守コストは減少するが、設備が故障するリスクは増加し、緊急保

守コストは増加する。逆に、保守間隔を短縮すると、設備の故障するリスクは減少し、緊急保守コストは減少するが、保守する回数は増加し、定期保守コストは増加する。近年の不況の影響を受けて、このような相反する関係の中で、定期保守と緊急保守のバランスのとれた設備保守計画を立案することが重要となっている。

従来より保守計画の評価に、設備の故障確率と緊急保守コストの積で表される期待コストが用いられてきた。この方法は、保守計画を定量的に評価することができることからよく用いられてきた。しかし、設備の故障発生は不確実であるため、その結果生じる緊急保守コストが発生するかどうか不確実である。このため、総保守コストは、最悪のケースから最良のケースまでの幅を持つ。したがって、期待コストという一点だけの評価では、適正にリスクを把握することができない。そこで、保守計画立案には、総保守コストの不確実性を考慮にいたした定量的評価が望まれている。

従来の保守計画立案には、メーカーが設備の仕様として公表しているピーテンライフに基づいて保守計画が立案されてきた。ピーテンライフとは、設備が故障する確率が10%となる時刻のことで³⁾、保守計画立案者は、定期保守と定期保守の間隔がピーテンライフの値になるように計画を立案してきた。この方法は全ての設備で一定の確率で故障を抑えることができる。しかし、従来の方法

では、定期保守が必要以上に行われるため、定期保守コストに多額の費用を要している。近年の企業の業務効率化の流れを受けて、コスト削減のために定期保守コストと緊急保守コストのバランスを考慮した適正な設備保守計画を立案することが必要になってきた。そこで、故障による緊急保守コストと定期保守コストを全て含めた総保守コストを最小化する保守計画の立案が望まれている。

3 不確実性下の保守コストとリスクの定量的評価と最適化

設備保守計画について、解決すべき課題は以下の2点である。総保守コストとは、設備の故障による緊急保守コストと定期保守コストを全て含めたコストである。

- ・保守に要する総保守コストの不確実性の定量的評価
- ・総保守コストを最小化する設備保守計画の立案

これらの課題を解決するために、本研究では、モンテカルロシミュレーションと遺伝的アルゴリズムを用いる保守計画最適化手法を提案する。本研究で取り扱う計画は日単位とする。また、定期保守や緊急保守の実施によって、設備の劣化がどの程度回復するかは設備によって様々であるが、今回は保守によって設備が交換されるかまたは交換同等まで劣化が回復するような設備保守を考える。

3.1 定量的評価の実現

保守に要する総保守コストの不確実性を定量的に評価するという課題を解決するために、本研究では、モンテカルロシミュレーションを用いた故障シミュレーションを考案した。

金属の弾性限界・電子機器の故障、人間の死といったような、一部の故障により機能全体の停止に至る現象を説明する分布としてワイブル分布がある。多数の部品で構成される設備の故障間隔はワイブル分布に従う。そこで本研究では設備の故障シミュレーションにワイブル分布を用いた。ワイブル分布は、形状パラメータと尺度パラメータで特徴づけられる³⁾。シミュレーションを行うには、これらの値を求める必要がある。一般に、多くの企業では過去の故障履歴から、設備の故障間隔(時間)の平均値と分散をデータとして持っている。本研究では、設備の故障間隔(時間)の平均値と分散からワイブル分布の二つパラメータを求めた。

次に、故障シミュレーションについて述べる。ある設

備について、 N を設備の定期保守実施回数の総数とし、設備の計画期間中の i 回目の定期保守実施時刻を Y_i とする。ただし、 Y_0 は前回の計画で最後に保守を実施した時刻、 Y_{N+1} を計画期間終了時刻とする。計画期間中における $i-1$ 回目の定期保守日から i 回目の定期保守日までの時間(=間隔)を $X_i = Y_i - Y_{i-1}$ とする。 X_1 は前回の保守計画で最後に実施した定期保守日から計画期間中で初めての定期保守日までの時間となり、 X_{N+1} は計画期間中で最後に実施する定期保守日から計画期間終了日までの時間となる。この様子を図1に示す。

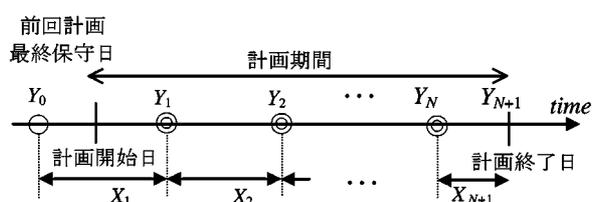


図1 設備の定期保守間隔

故障シミュレーションでは、モンテカルロシミュレーションを用いて、総保守コストを計算する。これにより総保守コストの不確実性を考慮に入れた定量的な評価が可能となる。シミュレーションの詳細を図2に示す。

設備ごとにワイブル分布に従う乱数を発生させ、各設備の故障間隔をシミュレートし、故障間隔が定期保守間隔よりも小さい場合は、設備が故障したとして、緊急保守コストを発生させて総保守コストに加算し、そうでなければ故障する前に定期保守が実施されたとして、定期保守コストを発生させて総保守コストに加算する。このように、一連の故障シミュレーションをすべての期間とすべての設備について行い、一回の評価が終了する。ここで、シミュレーションを終了すると各試行の総保守コスト $\alpha(s)$ 、 $s = 1 \sim M$ (M は試行回数)が得られる。

図2で求められた各試行の総保守コスト $\alpha(s)$ ($s = 1 \sim M$)より、総保守コストと総保守コストの不確実性を式(1),(2),(3)のように定量化できる。ただし、信頼区間上限については、総保守コスト $\alpha(s)$ ($s = 1 \sim M$)は昇順に並べられているものとし、信頼区間を r としている。

3.2 保守コストの最適化

設備保守に要する総保守コストを最小化する課題を解決するために、本研究では遺伝的アルゴリズム(GA)

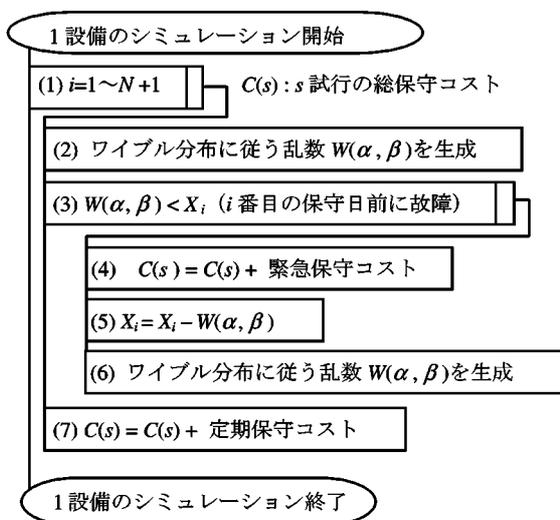


図2 故障シミュレーション

総保守コストの期待値 $E = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M C(s)$ (1)

総保守コストの分散 $V = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M (C(s) - E)^2$ (2)

信頼区間上限 $R = C\left(\frac{M(r+1)}{2}\right)$ (3)

を用いて最適な保守計画の立案を行った。遺伝的アルゴリズムは生物進化の原理に着想を得たアルゴリズムであり、対象問題の解を遺伝子と呼ばれる形で表現し初期化、評価、選択、交叉、突然変異と呼ばれる処理で構成される。

本報告で提案する遺伝的アルゴリズムを用いた最適保守計画立案システムは、図3に示すように最適化GAとシミュレータから構成される。まず、初めに(a)初期集団を生成し、続いて(b)各個体を評価する。評価の際に、シミュレータが各個体について3-1節で述べた(g)シミュレーションを行い、総保守コストを算出する。この総保守コストに基づいて(d)選択、(e)交叉、(f)突然変異によって次世代の集団が生成される。この次世代の生成はあらかじめ設定された(c)終了条件が満たされるまで行われる。(f)突然変異では、ビット反転、ビットコピー、ビットシフトという三つの突然変異の中からそれぞれ1/3の確率で一つを選択し、処理を行う。

以下、本システムの特徴である遺伝子の表現方法と初期集団の生成、突然変異について詳細に説明する。

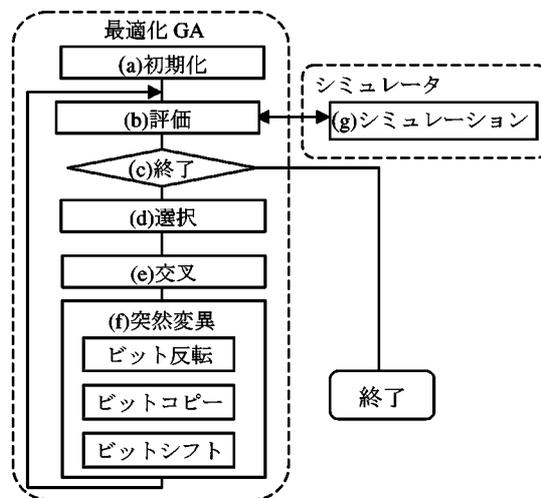


図3 最適化の流れ

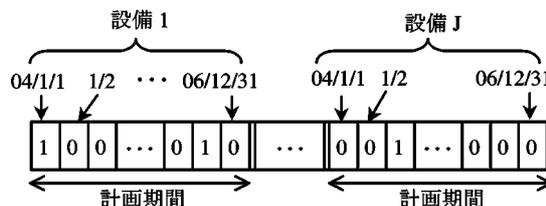


図4 染色体表現

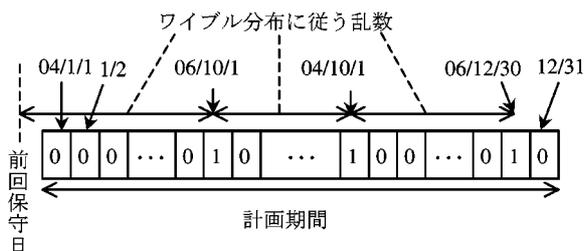


図5 故障間隔基準初期化

(1) 染色体表現

染色体にはバイナリ表現を用いた。保守する日を1、何もしない日を0とし、染色体長は設備保守計画の対象となる設備数と計画期間の積で表される(図4)。

(2) 故障間隔基準初期化による初期集団の生成

本研究では「故障間隔基準初期化」法を新たに開発した。この方法は、ある設備の初期化について、前回の保守計画で最後に実施された保守日(前回保守日)を基点としてその設備のワイブル分布に従う乱数の間隔でビットを1にする。これにより、ワイブル分布に従うランダムな間隔での定期保守計画が初期個体となる(図5)。

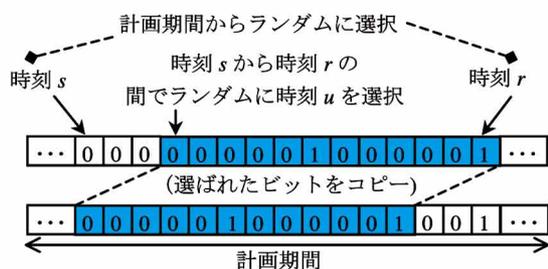


図6 ビットコピー ($r > s$)

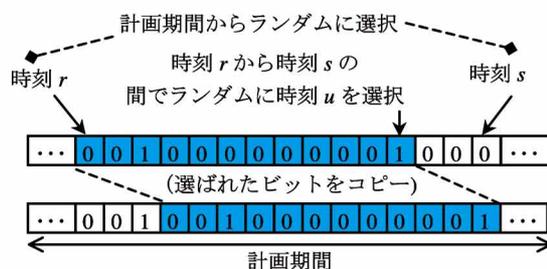


図7 ビットコピー ($r < s$)

(3) 突然変異

突然変異とは、遺伝子の値をビット単位で変化させる処理であり、局所探索を行う。

本研究では設備保守計画を効率的に最適化するために、「ビット反転」、「ビットコピー」、「ビットシフト」を組み合わせる方法を新たに提案する。

(a) ビット反転

ビット反転はすべての設備の各ビットについて、ある一定の確率でビットの値を反転させる。この突然変異によって1のビットが増加し定期保守実施回数が急増する恐れがあるので、ビット反転が発生する確率は小さく設定する必要がある。

(b) ビットコピー

ビットコピーを図6、図7を用いて説明する。まず、設備jの保守計画開始日から保守計画終了日までの計画期間について、一様分布に従う乱数を生成し、ランダムに二つの異なる時刻r, sを選ぶ。もし、 $r > s$ の場合、図6に示すように、時刻sから時刻rまでの期間について、一様分布に従う乱数を生成し、ランダムに時刻uを選ぶ。そして、設備jの時刻sから時刻rまでの期間で、時刻uから時刻rまでのビットをコピーする。一方、 $r < s$ の場合、図7に示すように、設備jの時刻rから時刻sまでの期間について一様分布に従う乱数を生成し、ランダムに時刻uを選ぶ。そして、設備jの時刻rから時刻sまでの期間で、時刻rから時刻uまでの染色体をコピーする。この操作をすべての設備について行う処理がビット部分列コピーである。

(c) ビットシフト

まず、上記したビットコピーと同じ操作を行い、さらに、コピーの影響を受けなかったビット(図6の時刻r-2から時刻rまでのビット、または図7の時刻rから時刻r+2までのビット)について、すべてのビットを0に変換する。この操作をすべての設備について行う処理がビットシフトである。

4 計算機実験

計算機実験により提案する手法の評価を行った。実験では鉄道会社から提供頂いたデータを参考にし、他の業種にも適用できるように、より一般的なデータ構造となるように単純化したデータを用いた。データは、設備数が50で、各設備の平均故障間隔と、その分散、定期保守コスト、緊急保守コストからなり、計画期間は730日である。各設備の平均故障間隔が半年から4年となるようにデータを作成した。各設備の緊急保守コストは、定期保守コストの2倍から10倍とした。

4.1 不確実性を考慮した定量的評価の実現

シミュレーションによる総保守コストの不確実性の定量的評価について実験を行った。実験では、各設備のピークライフを定期保守間隔とする従来手法で立案された保守計画について、シミュレーションを1,000回行った総保守コストを評価した。この結果を図8に示す。総保守コストの95%信頼区間の上限(97.5%点)は1,394M¥であった。この値は保守に要する総保守コストの最悪のケースと捉えることができる。この値を用いて、保守費用の予算を策定することが可能となる。また、総保守コストの分散は保守に要する総保守コストのばらつきの指標となる。分散は3,082であった。これより標準偏差は約56となるが、これは総保守コスト期待値である1,266M¥からの平均的なばらつきが56M¥程度であることを示す。この値は、計画案を修正し、再度シミュレーションを行った時に、修正前と修正後で総保守コストのばらつきがどのくらい変化するかを比較し、計画を修正するかどうかを決定する際の指標として用いることが可能である。以上に示すように総保守コストの不確実性の定量的評価が実現された。

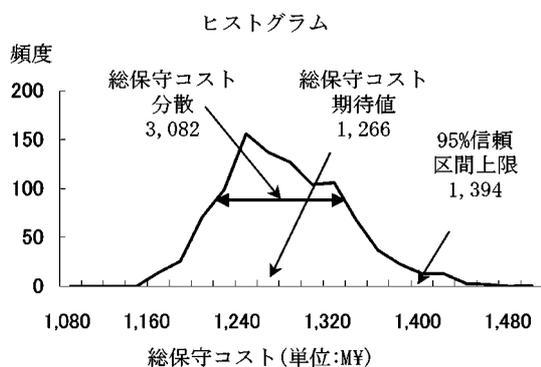


図8 総保守コストの不確実性の定量的評価

表1 実験による各種数値(単位:M¥)

	総保守コスト 期待値	総保守コスト 分散	信頼区間 上限値
従来手法	1,266	3,082	1,364
GA 1 試行	1,173	5,856	1,337
GA 2 試行	1,183	6,173	1,343
GA 3 試行	1,178	6,357	1,350
GA 4 試行	1,164	5,809	1,332
GA 5 試行	1,196	5,699	1,359
GA 6 試行	1,156	6,457	1,322
GA 7 試行	1,235	7,306	1,412
GA 8 試行	1,181	6,922	1,349
GA 9 試行	1,149	6,384	1,327
GA10試行	1,161	5,691	1,305

4.2 故障シミュレーションと遺伝的アルゴリズムによる設備保守計画の最適化評価

保守計画最適化の評価を行うために、遺伝的アルゴリズムを用いた実験を行った。実験では、集団数50、世代数50とし、選択にランク選択、交叉に設備単位の一様交叉、また評価の高い個体を効率的に次世代に残すためにエリート戦略を導入した⁴⁾。評価関数は総保守コストの期待値とし、一個体の評価時のシミュレーションは1,000回行った。評価用のシステムはMicrosoft社のVisual C++で実装し、最適化に要した時間はPentium 800MHz、512MバイトのRAM、WindowsNT4.0WSのPC上で平均約35分であった。提案するシステムで、10試行の評価実験を行った。また、比較のために各設備のピーテンライフに基づいた従来手法で立案した計画の評価も行った。実験結果を表1、図9に示す。表1より提

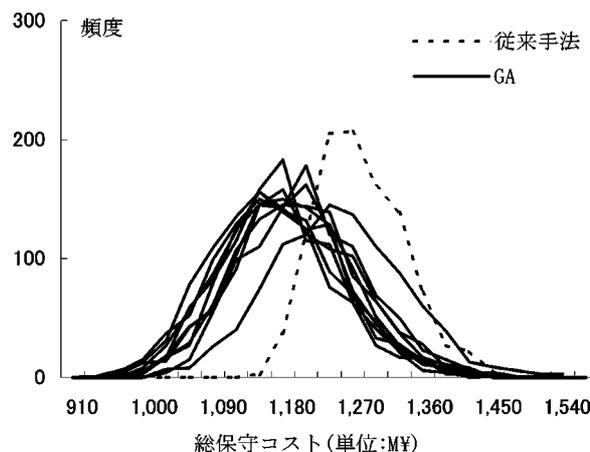


図9 従来手法と提案手法の総保守コストヒストグラム

案手法で最適化した総保守コスト期待値は従来手法と比較してよい結果が得られていることが確認できる。また提案手法の各試行と従来手法の有意差を検定するために有意水準1%のt-検定⁵⁾を行った。その結果、10試行すべてで従来手法による総保守コストとの間に有意な差があることが確認できた。表1で総保守コスト分散は従来手法と比較して大きいのが、図9から明らかのように、提案手法は従来手法と比較して、総保守コストの小さいほうに分布が広がっている。また、保守に要する総保守コストの最悪のケースである95%信頼区間上限と比較しても従来手法よりも小さく、リスクを抑えている。これにより従来手法より提案手法が優れていることが確認できた。

5 おわりに

本報告では、設備保守計画にモンテカルロシミュレーションを用いて、故障時に発生する緊急保守コストも含めた総保守コストをシミュレートし、総保守コストの不確実性を定量的に評価する方法を実現した。保守に要する総保守コストの不確実性を総保守コストの分散や信頼区間上限として評価することで、保守に要する総保守コストのばらつきや最悪のケースを定量的に評価することができる。

また、遺伝的アルゴリズムを用いて、保守に要する総保守コストを最小化するような保守計画を立案する方法を実現した。評価実験の結果、提案する手法は、従来から用いられている設備のピーテンライフで計画を立案する手法と比較して総保守コストを削減できることを確認した。

本提案システムの実用化を行うには、いくつかの検討が必要である。例えば、本報告では制約条件のない保守計画を最適化した。実際には制約条件を考慮に入れて最適化を行う必要がある。制約条件は、例えば、法律で定められた間隔で保守を実施する制約、1日に保守できる回数の制約、さらに保守する場所によっては環境等の影響で保守できる期間が定められているなどが挙げられる。今後、これらの課題を解決していくことで、製品化につなげていきたい。

参考文献

- 1) 津田 孝夫, “モンテカルロ法とシミュレーション”, 培風館, 1995
- 2) Zbigniew Michalewicz, “Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs”, Springer, 1999
- 3) 真壁 肇, “信頼性工学入門”, 日本規格協会, 1996
- 4) 北野 宏明, “遺伝的アルゴリズム”, 産業図書, 1993
- 5) 州之内 治男他, “演習確率統計”, サイエンス社, 1976



山崎 伸晃 2002年入社
研究開発部第1グループ
設備保守ソリューションの研究・開発
nobuaki@hitachi-to.co.jp



手塚 大 1994年入社
研究開発部第1グループ
意思決定支援, リスク分析, 最適化技術
の研究・開発
tezuka@hitachi-to.co.jp