メタヒューリスティクスを用いた複数の破壊モードを持つ ライフラインネットワークの信頼性解析[†]

石橋 健* 古田 均** 野村 泰稔***
中津 功一朗**** 高橋 亨輔*****

Application of Metaheuristic Method to Reliability Analysis for Lifeline Network Involves Multiple Failure Modes

by

Ken ISHIBASHI*, Hitoshi FURUTA**, Yasutoshi NOMURA***,
Koichiro NAKATSU**** and Kyosuke TAKAHASHI*****

The reliability analysis is necessary to maintain the safety of structure. In order to evaluate the soundness of structure quantitatively, the calculation of failure probability is one of useful measures. In the reliability analysis for large-scale structures, the enhancement of calculation accuracy and the estimation of factors for the failure require the failure probability calculated by considering the various failure modes. However, the sampling method like Monte Carlo simulation is difficult to calculate the failure probability and estimate multiple failure modes efficiently. This is because the search of various failure modes increases the calculation cost significantly. Therefore, in order to overcome the trade-off, this paper attempts to propose an efficient method by applying Metaheuristic methods. Metaheuristic methods are characterized by the high search ability with keeping the diversity among solution candidates. Firstly, the search of failure modes is formulated as the combinatorial optimization. In this optimization, the metaheuristic method searches failure modes in consideration of the occurrence probability of minimal cut set. In this way, various failure modes that have high occurrence probability are obtained efficiently. Secondly, Probabilistic Network Evaluation Techniques (PNET) is applied to calculate the failure probability of network in consideration of the correlation among obtained failure modes. Through these processes, the proposed method can calculate the accurate failure probability efficiently. Several numerical experiments are presented to demonstrate the applicability of the proposed method for the reliability analysis of large-scale networks.

Key words : Reliability analysis, Lifeline network, Failure modes, Metaheuristic, Minimal cut set, Probabilistic network evaluation techniques, Markov chain monte carlo

1 緒 言

構造物の信頼性解析は、安全性の確保や合理的な補修・補強を行うために必要不可欠である。構造物の健全性の評価では、点検時の状態を含む不確実性を考慮することが求められる。そのため、構造物の強度や外力を確率変数として扱うことによる損傷確率の算定が行われている。¹⁾ライフラインネットワークのような大規模構造物は、複雑で多様な破壊モードを有する。複数の破壊モードを考慮した損傷確率の算定は、定量的評価の精度向上だけでなく、損傷要因の推定や適切な対策を検討するために必要である。よって、少ない計算コストで高い算定精度を持つ損傷確率の算定手法が求められている。^{2), 3)}

既往研究では、モンテカルロ法に基づく効率的な損傷

確率の算定手法に関する研究が行われている。これらの手法では、対象とする構造物の強度や外力から構成される確率空間において、空間全体の形状把握と損傷領域に対する集中的なサンプリングによって、構造物の損傷確率が算定される。そのため、マルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)^{4), 5)}や重点サンプリング⁶⁾、サブセット法⁷⁾のような効率的なサンプリング手法が適用されてきた。しかしながら、これらのような確率密度分布に基づく手法では、大規模構造物の信頼性解析において、多様な破壊モードを考慮した損傷確率を算定することが困難である。これは、破壊モード間の発生確率に大きな差があり、多様なモードを考慮しても損傷確率の算定結果にあまり影響がないからである。その結果、効率的な算定を行う手法では、

[†] 原稿受理 平成 25 年 6 月 10 日 Received June 10, 2013 ©2014 The Society of Materials Science, Japan

* 関西大学大学院総合情報学研究所 〒569-1095 高槻市霊仙寺町, Graduate School of Informatics, Kansai Univ., Ryozenji-cho, Takatsuki, 569-1095

** 正 会 員 関西大学総合情報学部 〒569-1095 高槻市霊仙寺町, Faculty of Informatics, Kansai Univ., Ryozenji-cho, Takatsuki, 569-1095

*** 正 会 員 立命館大学理工学部 〒525-8577 草津市野路東, Faculty of Sci. and Eng., Ritsumeikan Univ., Noji-Higashi, Kusatsu, 525-8577

**** 大阪城南女子短期大学現代生活学科 〒546-0013 大阪市東住吉区湯里, Dept. of Modern Life, Osaka Jonan Women's Junior College, Higashi-Sumiyoshi-ku, Osaka, 546-0013

***** 香川大学危機管理研究センター 〒761-0396 高松市林町, Kagawa Univ., Crisis and Security Management Res. Center, Hayashi-cho, Takamatsu, 761-0396

発生確率が低い破壊モードのサンプリングが行われない傾向がある。

ネットワークでは、ノードやリンクのような各構成要素の破壊が同時に発生し、供給点と需要点との間の連結が損なわれることで損傷となる。^{8), 9)}そのため、供給点と需要点、およびそれら周辺の要素を除いたネットワークの損傷は、発生確率が低いことが一般的である。道路や電気、ガス、水道のようなライフラインネットワークは大規模、かつ複雑なネットワークであることから、このような特性を持つ可能性が非常に高い。これらの理由より、上述の効率的なサンプリング手法は、損傷確率の算定には有効であるが、損傷に関わる重要な要素を推定が困難な可能性がある。¹⁰⁾

本研究では、ネットワークの信頼性解析に有効な損傷確率の算定手法の提案を試みる。提案手法では、メタヒューリスティクス手法を用いて多様な破壊モードを探索することで、効率的な損傷確率の算定を行う。前研究¹¹⁾では、メタヒューリスティクスの損傷確率算定に対する適用可能性が示されている。本研究では、ネットワークの最小カットセットの探索に対してメタヒューリスティクスを適用し、PNET (Probabilistic Network Evaluation Technique)¹²⁾を用いて得られた結果から損傷確率を算定する。このように定式化することで設計空間を簡略化でき、大規模ネットワークにおいても多様な破壊モードを効率良く探索できると予想される。数値実験において、MCMC Importance Sampling 法¹⁰⁾との比較を行うことで、提案手法の有効性を検証する。

2 メタヒューリスティクスを用いた損傷確率の算定

2.1 破壊モードの探索の定式化

本研究では、ノードとリンクをネットワークの構成要素として扱い、各要素の状態を正常と破壊の2状態とする。このようにして、 n 個の要素から成るネットワークの状態は、 2^n 個の組合せとして表される。そして、供給点から需要点までの連結が損なわれた状態をネットワークの損傷として扱う。

ネットワークの損傷は、グラフ理論に基づいて解析可能であるが、構造物の信頼性を評価するために発生確率を同時に考慮する必要がある。^{8), 9)}損傷確率を算定するためには、ネットワークが含む破壊モードの発生確率を求める必要がある。そこで、1つの解候補が表すネットワークの状態の評価値として、各要素の状態の組合せに含まれる最小カットセットの発生確率を用いる。ここで、最小カットセットの発生確率は、事前にモンテカルロ法を用いて各要素の破壊確率を求めておき、該当する要素の同時発生確率として計算を行う。

このように定式化を行うことにより、メタヒューリスティクス手法はナップサック問題と同様の方法で解探索を行うことができる。モンテカルロ法のようなサンプリングに基づく手法では、各要素の強度や外力の確率分布を考慮してサンプルを発生させるため、複数の要素が破壊した発生確率の低いサンプルを取得するためには膨大な計算時間が必要となる。一方、本研究の定式化では、

探索の際に確率変数の影響を受けないことから、多様な状態を考慮した評価を行いやすいという利点がある。さらに、大規模ネットワークであっても、各要素の破壊確率を算定することは、与えられた確率分布から容易に行えると予想される。

2.2 リサンプリング MAO

メタヒューリスティクス手法は、基本的には単一の最適解を探索することを目的とする。破壊モードの探索では、発生確率の高い順に様々な解を得ることが求められる。よって、前研究¹¹⁾と同様に、リサンプリング MAO (Multi-Agent Optimization) を適用する。リサンプリング MAO の探索手順は以下の通りである。

ステップ 1: 各解候補の状態の初期化

ステップ 2: 解候補の行動

ステップ 3: リサンプリング

ステップ 4: もし探索が終了条件を満たしていなければステップ 2 へ、そうでなければ探索完了。

この手法では、各解候補が近傍を参照しながら自律的に行動し、相互作用によって全体が協調することで解探索が行われる。そして、発生確率の高い順に複数の解を得るために、リサンプリングと探索履歴を利用する。リサンプリングとは、解候補の状態をすべてランダムに変更することで初期化する処理であり、履歴から探索状況を把握し、状況に応じて評価指標を変更することで効率良く複数の解を探索することができる。これを行うために、探索履歴として保存された解候補の情報は、参照相手として利用される。2.1 節で述べた問題における解候補のコーディングを Fig. 1 に示す。

提案手法における破壊モードの探索では、各要素の状態が設計変数として扱われる。要素が正常なら「0」、破壊されているなら「1」としたとき、解候補は Fig. 1 に示すような2値の配列として表される。解探索を行う際、

Fig. 1 Action of solution candidate.

各解候補は、距離が近い他の解候補を参照相手として選択し、相手との関係性に基づいて接近、反発、および均衡の中から状態改善に適した移動を行う。Fig. 1において、2値の配列の色が塗られている箇所は参照相手と値が異なることを表しており、移動の例として新たな状態に付けられている楕円は移動によって変更された箇所を表している。例えば、自身よりも良い状態の解候補を参照相手として選択した際には、「接近」を採用することで、Fig. 1のように状態を相手と同じように変化させる。これは、近接最適性原理に基づき、良い相手へ近づくことで、自身の状態が改善されることが多くの最適化問題において成り立つからである。参照相手が自身より悪いときには反発、同等なときには均衡を採用することで、解候補はそれぞれが状態を改善する確率が高い行動を取ることによる解探索を行う。なお、本研究では、ハミング距離を解候補間の距離として用いた。

リサンプリング MAO によって発生確率が高い複数の破壊モードを探索するために、提案手法では、解候補は次のようなルールによって比較が行われる。

解候補は、ネットワークの状態に応じて、状態改善を行うための比較が行われる。(1) ネットワークが正常な解候補は、破壊された要素を増やすことでネットワークを損傷状態へ近づけることを行動の目的とする。そのため、状態を表す2値の配列に含まれる破壊要素の数を評価値として用い、破壊要素が多いほど優れた解候補となるよう比較される。(2) 損傷したネットワークを表す解候補は、状態が含む最小カットセットの発生確率を評価値として用いることで、発生しやすい破壊モードの探索を行う。発生確率に基づいて複数の破壊モードを探索するために、状態(2)の比較は、探索履歴に基づいて評価指標が決定される。提案手法では、最小カットセット毎に履歴を保存し、解候補が表す最小カットセットのグループの履歴数によって、比較に用いる発生確率を決定する。最小カットセットの発生確率は次の式で求められる。

$$p(x) = \prod_{i=1}^m \prod_{j \in F_i} f(x_j) \quad (1)$$

式(1)において、 $p(x)$ は最小カットセットの発生確率を表す。 m は解候補に含まれる最小カットセットの数を表し、 F_i は該当するカットセットが含む要素の集合、 $f(x_j)$ は要素 j の破壊確率である。まず、異なる最小カットセットに属する解候補間の比較では、カットセット毎に保存されている履歴数によって評価指標を決定する。履歴数が多いカットセットでは、最小カットセットだけでなく、同時に破壊された要素の破壊確率も乗じた状態の発生確率の中で最小のものを履歴の中から採用する。一方、履歴数が少ない、または同じ際には式(1)で求めた最小カットセットの発生確率を評価指標として採用する。そして、値が大きいほど優れているものとして、決定された指標の比較を行う。次に、同じ最小カットセットに属する解候補同士の比較では、発生確率の差がないことから、カットセットに含まれない破壊された要素の数を用いて比較する。このとき、破壊された要素数が少ないものを優れ

ているものとして比較することで、特定のカットセット内での集中的な探索を行う。さらに、同じカットセット内での比較において、破壊要素が自身より少ない履歴を参照した際には、すでに探索が行われているものとして現在の状態を履歴として保存し、解候補の状態を初期化する。このように履歴の保存と解候補のリサンプリングを行うことで、履歴数をカットセットの探索度合いとして扱い、リサンプリングされた解候補は、探索状況に応じて様々な最小カットセットを探索することになる。また、異なる状態の解候補の比較は、状態(1)より状態(2)の方が優れているものとする。このように決定された関係性により、解候補は適切な移動方法を採用しながら、効率的に多数の解候補を探索することができる。

リサンプリング MAO では、履歴を利用することで、多様な破壊モードを探索できる。しかしながら、問題の規模が大きくなるにつれて、保存が必要な履歴数が増加し、参照相手として利用する際の計算コストが膨大となる。そこで、最も発生確率の高い最小カットセットのグループ内で最も低い発生確率を基準とし、この値より高い発生確率を持つ最小カットセットのみを探索履歴として保存することとした。これは、発生確率の高い順に探索が行われるからであり、グループの最小の発生確率の低下は特定のグループの探索が十分に行われたことを意味するからである。このように保存する履歴を制限することで、計算時間を短縮することはできるが、精度の低下を招く可能性がある。本論文では、すべての実験においてこの方法を用いることで、その有効性を検証する。

2・3 PNET による損傷確率算定

複数の最小カットセットが存在するとき、各カットセットは重複する要素を含む可能性がある。そのため、カットセット間の相関性を考慮した損傷確率を算定が必要とされる。本研究では、PNET^[12]を用いることで、近似的に損傷確率を算定することを試みる。提案手法におけるカットセット間の相関係数の求め方をFig. 2に示す。

提案手法では、破壊された要素に基づくリンクの損傷状態によって相関係数が決定される。Fig. 2に示すように、損傷箇所の重複が多いほど相関係数が高くなる。例えば、sample j のリンクの損傷状況は sample i において損傷しているすべてのリンクを含むことから、相関係数

Fig. 2 Calculation of correlation between cut sets.

は最大の1となる．一方，sample l は sample i と共通している損傷状態のリンクは1つだけであることから相関性が低く，Fig. 2 では閾値 ρ_0 より相関係数が低いことから独立した要素とみなす．このようにして，提案手法は複数の破壊モードを考慮した損傷確率の算定を試みる．

3 数 値 実 験

提案手法の適用可能性を検証するために，次元数の異なるネットワークモデルにおいて，モンテカルロ法，および MCMC Importance Sampling 法¹⁰⁾との比較を行う．そして，大規模ネットワークの信頼性解析における有効性を検証する．

3・1 適用可能性の検証

Fig. 3 に示す 17 部材 (8 ノード，9 リンク) のネットワーク問題^{10), 11)}において，提案手法の適用可能性を検証する．本研究では，既存研究と同様の定義を用いてネットワークの信頼性解析を行う．対象とするモデルの各部材の強度分布を Table 1 に示す．ここで，各分布はすべて正規分布に従うものとし，平均値を μ ，標準偏差を σ としたときの分布を $N(\mu, \sigma^2)$ と表記する．ネットワークに対する外力 F は $N(3.0, 0.3^2)$ の分布に従う確率変数とし，外力が強度を上回るときに要素の破壊が生じることとする．また，部材間に相関はなく，すべて独立した分布に従う．提案手法のパラメーター設定では，解候補数を 30，実行世代数を 300，悪化受理率を 20% と設定する．各要素の破壊確率は，事前にモンテカルロ法を用いて 100 万個のサンプルを生成して算定したものを用いる．PNET の相関係数の閾値 ρ_0 は 0.8 とする．比較手法の設定では，モンテカルロ法は 100 万個のサンプルで損傷確率の算定を行う．MCMC Importance Sampling 法のサンプリング回数は，設計点探索ステップを 5 000 回，損傷確率算定ステップを 10 000 回とする．ただし，いずれの手法においても，供給点 N1，および需要点 N8 が損傷したサンプルは解析の対象外とした．本研究では，供給点から需要点までの連結が破壊された状態をネットワ

Fig. 3 Network model with 17 components.

Table 1 Distribution capacities of components in 17 dimensional network.

Node	Capacity	Link	Capacity
N1	$N(6.8, 0.8^2)$	L1	$N(7.0, 1.0^2)$
N2	$N(6.8, 0.8^2)$	L2	$N(6.5, 0.7^2)$
N3	$N(6.8, 0.8^2)$	L3	$N(6.5, 0.7^2)$
N4	$N(6.8, 0.8^2)$	L4	$N(7.0, 1.0^2)$
N5	$N(7.0, 1.0^2)$	L5	$N(7.0, 1.0^2)$
N6	$N(7.0, 1.0^2)$	L6	$N(7.0, 1.0^2)$
N7	$N(6.9, 0.9^2)$	L7	$N(8.0, 1.5^2)$
N8	$N(7.0, 1.0^2)$	L8	$N(6.0, 0.5^2)$
		L9	$N(7.0, 1.0^2)$

クの損傷とみなす．そのため，これらの安全性が重要であることは明白だからである．これから生じる損傷サンプルの発生確率は，複数の要素の破壊に起因する損傷サンプルより高くなる．よって，損傷に対する重要性が明らかではないサンプルの発生確率を考慮した信頼性解析を行う．各手法を 10 回ずつ試行して算定した損傷確率を Fig. 4 に示す．

損傷確率の算定精度は，提案手法が他の手法と比較して優れていた．事前に損傷サンプルを 100 万個取得するまでモンテカルロ法を繰り返すことで求めた損傷確率とほぼ同等の値を安定して算定できており，高い算定し精度を持つと考えられる．計算時間は，モンテカルロ法が約 5 分であったのに対して，提案手法と MCMC Importance Sampling 法は共に約 3 秒であったことから，計算効率も高いことを確認した．なお，本実験で用いた PC のスペックは，Intel (R) Core (TM) i7CPUQ740@1.73GHz，メモリ 4GB，Windows7 64bit である．リサンプリング MAO によって取得した最小カットセットへ PNET を適用することで得られた破壊モードは，いずれの試行においても約 10 種類は取得できた．取得できた破壊モードとそれらの発生確率の一例を Table 2 に，それらを取得した際のリサンプリング MAO の探索推移を Fig. 5 に示す．

Fig. 4 Calculation of failure probability.

Table 2 Obtained failure modes and their occurrence probability.

Mode	Probability	Mode	Probability
N5	6.370E-05	N6, L9	4.077E-09
L5	6.360E-05	L1, L4	4.070E-09
N4	4.310E-06	L6, L9	4.064E-09
N6, L7	3.457E-08	L1, L2	1.367E-10
L6, L7	3.446E-08	L7, L8	7.520E-11

Fig. 5 Search process of cut sets in proposed method.

Table 2 に示す破壊モードは、リサンプリング MAO によって得られたカットセットから抽出して得られたものである。Fig. 5 に示すように、探索によって約 150 個のカットセットを得られたが、供給点と需要点の破壊を含むカットセット、および PNET による相関性の考慮によって 10 種類の破壊モードを得ることができた。Fig. 5 において、探索されたカットセットの履歴数は実行世代数と共に増加しているが、世代毎に評価基準に基づく最良の解候補の発生確率は何度も上下している。これは、解候補を最小カットセットのグループとして扱い、グループ内の履歴数に応じて優劣が変化するからである。探索の前半では、Table 2 の要素 N5 のみが破壊されたモードのグループが最良解として扱われていた。これに対して、後半では、N4 のみが破壊されたモードのように発生確率が低い解候補の方が優れていると判断されるようにグループの履歴に基づいて評価基準が変化し、様々な破壊モードの解候補を探索することができた。このように発生確率の高い順から最小カットセットを探索することで、ネットワークの損傷に大きな影響を与える要因の特定に対しても有効と考えられる。以上の結果より、提案手法は、ネットワークの信頼性解析へ適用可能であると言える。

3・2 30 次元ネットワークへの適用

モンテカルロ法では損傷確率の算定が困難な問題へ適用することで、提案手法の有用性を検証する。まず、Fig. 6 に示す 30 次元ネットワーク（14 ノード、16 リンク）への適用を試みる。各要素の強度分布は Table 3 に示すものを用い、外力 F は $N(2.4, 0.3^2)$ に従う確率変数とした。

Fig. 6 Network model with 30 components.

Table 3 Distribution capacities of components in 30 dimensional network.

network.			
Node	Capacity	Link	Capacity
N1	$N(6.5, 1.0^2)$	L1	$N(7.1, 1.0^2)$
N2	$N(7.0, 1.1^2)$	L2	$N(7.0, 1.0^2)$
N3	$N(6.3, 1.1^2)$	L3	$N(7.0, 0.9^2)$
N4	$N(7.2, 1.0^2)$	L4	$N(6.3, 1.0^2)$
N5	$N(6.5, 1.0^2)$	L5	$N(6.8, 1.0^2)$
N6	$N(6.8, 1.2^2)$	L6	$N(7.2, 0.8^2)$
N7	$N(7.0, 1.0^2)$	L7	$N(6.9, 1.0^2)$
N8	$N(7.2, 0.9^2)$	L8	$N(7.0, 1.0^2)$
N9	$N(6.7, 1.0^2)$	L9	$N(6.9, 1.1^2)$
N10	$N(7.2, 0.9^2)$	L10	$N(7.1, 1.0^2)$
N11	$N(6.7, 1.0^2)$	L11	$N(7.0, 1.0^2)$
N12	$N(6.4, 1.0^2)$	L12	$N(6.9, 1.1^2)$
N13	$N(6.8, 1.0^2)$	L13	$N(6.8, 1.0^2)$
N14	$N(6.9, 1.0^2)$	L14	$N(6.7, 1.0^2)$
		L15	$N(6.9, 0.9^2)$
		L16	$N(6.9, 0.9^2)$

提案手法のパラメーター設定では、3・1 節のパラメーターから解候補数を 50、実行世代数を 1000 に変更した。各要素の破壊確率は、モンテカルロ法により 2 億個のサンプルを発生させることで算定したものを用いる。また、MCMC Importance Sampling 法は前実験と同じパラメーターを用いる。それぞれの手法を 10 回ずつ試行して得られた損傷確率を Fig. 7 に示す。

この問題では、供給点、および需要点の破壊を除いた損傷確率の厳密解を算定することが困難である。提案手法では、各試行において平均 46 種類の破壊モードを考慮した損傷確率の算定が行われた。MCMC Importance Sampling 法も平均 36 種類と様々な破壊モードを考慮した損傷確率の算定が行われていた。しかしながら、MCMC Importance Sampling 法による損傷確率算定では、MCMC によって探索された設計点が多数得られるため、重点サンプリングの適用が適切とは言いがたい。さらに、設計点には特定の要素が重複した最小カットセットが含まれており、損傷確率を高く算定している可能性がある。これに対して、提案手法では、PNET を用いることで、損傷要因が重複した最小カットセットを取り除いて損傷確率を算定していることから、算定精度がより正確であると予想される。計算時間は、MCMC Importance Sampling 法が平均 11 秒に対して、提案手法は平均 22 秒であった。

3・3 66 次元ネットワークへの適用

次に、より規模の大きいネットワークへの適用を試みる。本実験では、前研究¹⁰⁾において用いた 66 次元ネットワーク（29 ノード、37 リンク）に対して提案手法を適用する。ネットワークのモデルを Fig. 8 に示す。外力 F は $N(2.4, 0.3^2)$ に従う確率変数とする。ノードの強度分布はすべて $N(6.9, 0.9^2)$ に従い、リンクの強度分布は平均値 μ が [6, 8]、標準偏差 σ が [0.5, 1.5] の範囲内でリンク

Fig. 7 Comparison of calculated failure probability.

Fig. 8 Network model with 66 components.

Fig. 9 Applicability for large-scale network model.

毎にランダムに決定された分布 $N(6.9, 0.9^2)$ に従う。提案手法のパラメーターは、3・2節の実験から実行世代数のみを1500に変更した。MCMC Importance Sampling法は同じパラメーターを用いる。それぞれの手法を10回ずつ試行して得られた損傷確率をFig. 9に示す。

Fig. 9より、提案手法であっても損傷確率の算定結果にばらつきがあることがわかる。この問題において損傷確率算定の際に考慮された破壊モードの種類数は、MCMC Importance Sampling法が平均57であったのに対して、提案手法は平均8と大きな差が見られた。特に、試行毎に考慮された破壊モード数は最大で30、最小で4、標準偏差7.917であり、十分な精度が得られなかった。損傷確率の算定結果は、PNETによって最小カットセットの相関を考慮していることから、2回目、および3回目に算定された損傷確率がより正確な値であると考えられる。一方、MCMC Importance Sampling法は、3・2節で述べた考察と同じように、ある程度の損傷確率を算定することができるが、試行ごとのばらつきが大きいという問題が見られた。計算時間は、MCMC Importance Sampling法が平均で1分5秒、提案手法が平均3分30秒であった。

以上の結果より、設計点数の増加は損傷確率の算定精度へ影響を与えるため、MCMC Importance Sampling法によって多様な破壊モードの考慮と損傷確率の算定を同時に行うことは困難と予想される。一方、提案手法は、MCMC Importance Sampling法と比較して計算時間が増加するが、実用性が損なわれるほどの増加は見られなかった。損傷確率の算定精度、および多様な破壊モードの考慮は、大規模な問題において、本実験で用いたパラメーターでは困難であることがわかった。

4 結 言

本論文では、メタヒューリスティクス手法を用いることで、ライフラインネットワークに対して有効な信頼性解析手法の提案を試みた。提案手法は、メタヒューリスティクス手法の特徴に着目し、多様な破壊モードを効率的に探索するための問題の定式化、および手法の適用を行った。次元数が異なるネットワークモデルにおいて、従来手法であるMCMC Importance Sampling法との比較を行い、提案手法の適用可能性、有用性、および現実問題への適用のための問題点を明らかにした。

規模の小さい問題では、メタヒューリスティクス手法

によって探索された最小カットセットがモンテカルロ法によって推定した厳密解と一致することを確認した。また、PNETによって最小カットセット間の相関性を考慮することで、より精度の高い損傷確率を算定できることを示した。モンテカルロ法と比較して大幅な計算時間の削減も可能であり、計算効率の良い損傷確率の算定ができると予想される。

大規模なネットワークへの適用では、適用するメタヒューリスティクス手法やPNETなどの損傷確率算定手法を改善することで、多様な破壊モードの取得と効率的な損傷確率の算定を行えると考えられる。本論文で提案した問題の定式化、および手法の枠組みは、現状でも精度は低いが無効な解を得ることができた。したがって、手法の改良と共に、より現実的な問題における有用性の検証を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) T. Cho, "Structural Reliability Design as Fundamental Knowledge", Sankaido (1993).
- 2) H. Watanabe, "Institution of bayesian statistics", Fukumura Shuppan (1999).
- 3) T. Tsuda, "Monte carlo method and simulation -stochastic application of computer-", Baifukan (1997).
- 4) W. R. Gilks, S. Richardson and D. J. Spiegelhalter, "Markov chain monte carlo in practice", CHAPMAN & HALL/CRC (1996).
- 5) I. Yoshida and T. Sato, "Effective estimation method of low failure probability by using markov chain monte carlo", Proceedings of JSCE (794), pp.43-53 (2005).
- 6) K. Nakagawa, "On the importance sampling simulation and its application", ISCIE Journal 'System, Control and Information', Vol.43, No.3, pp.123-128 (1999).
- 7) S-K. Au and J. L. Beck, "Subset simulation and its application to seismic risk based on dynamic analysis", Journal of Engineering Mechanics, Vol.129, No.8, pp.901-917 (2003).
- 8) H. Enomoto, "Institution of Graph Theory", Nippon-Hyoron-sha (1988).
- 9) S. Takada, "Lifeline earthquake engineering", Kyoritsu Shuppan (1991).
- 10) H. Furuta, K. Nakatsu, K. Ishibashi, N. Motomura and S. Shimizu, "Efficient calculation of low failure probability by using MCMC importance sampling", Proceedings of 25th JSMS Symposium on Reliability, pp.86-91 (2010).
- 11) H. Furuta, K. Takahashi, Y. Nomura, K. Nakatsu and K. Ishibashi, "Reliability analysis of large-scale structures with multiple failure modes by using metaheuristics", Proceedings of 26th JSMS Symposium on Reliability, pp.196-200 (2012).
- 12) A. H-S. Ang, J. Abdelnour and A. A. Chaker, "Analysis of activity networks under unvertainty", Journal of Engineering Mechanics Division, Vol.101, No.EM4, pp.373-387 (1975).