

保全内容の変更判断をバックアップする数理手法の適用状況調査

Investigation on application examples of mathematical techniques to support judgement to modify maintenance practices

○日本原子力発電株式会社	堂崎 浩二	Koji DOZAKI	Member
東芝エネルギーシステムズ株式会社	行則 茂	Shigeru YUKINORI	Non Member
日本原子力研究開発機構	高屋 茂	Shigeru TAKAYA	Member
三菱重工株式会社	和地 永嗣	Eiji WACHI	Non Member
東北大学	青木 孝行	Takayuki AOKI	Member

It is important for maintenance of nuclear power station facilities in the future to promote mathematical techniques which support judgement to modify maintenance practices, such as maintenance tasks, maintenance implementation timing, and so on. Mathematical Maintenance Working Group, which has been established by Maintenance Standardization Committee since July 6, 2018, is investigating application examples of such mathematical techniques in maintenance planning as influence evaluation of changing maintenance tasks based on inspection results, or evaluation of optimized maintenance implementation timing, and so on. The status of these investigation examples are reported.

Keywords: Maintenance Standardization, Bayesian Statistics, Load and Resistance Factor Design

1. 緒言

日本保全学会保全標準化検討会では、新検査制度の導入を目前に控える原子力産業界に寄与するため、中立的な立場から、図1に示す幅広い保全の構造における様々な要素に係る標準化、規格化等について検討している。この活動のひとつとして数理保全WG（以下、本WGという）を設け、保全タスクや保全実施時期等の保全内容に係る変更判断をバックアップする数理的手法の積極的利用を推進するため、検査実績を踏まえた保全タスク変更の影響評価や最適保全実施時期の評価等、保全計画における数理的手法の適用状況について文献等に基づき調査しており、その状況を報告する。

2. 数理モデルの保全活動への活用

本WGでは、保全活動に数理モデルを活用する目的意識を次のようにまとめている。

- 保全はこれまで経験に基づき実施してきた。その延長で保全を適正化していくことは重要であるが、極力主観を排し客観的な指標に基づき評価し、保全の変更の是非を判断することも今後重要となる。このため数理モデルの保全活動への活用に着目している。
- 点検間隔延伸、頻度緩和等の検討に当たって確信をもって判断するために数理モデルを使用することが適切と考える。特に安全重要度の高い構築物、系統、機器の保全活動簡素化への数理モデル適用には慎重な対応が必要となるものの、適用を継続し実績を積み上げることで適用範囲は次第に拡大するものと考えられる。
- 数理モデルには前提条件の不確定性による適用限界があることを認識し、評価結果に盲従しないことが重要である。同時に、評価結果に悲観する必要もなく、参考情報として適切に活用することが肝要である。
- 保全学会として数理モデル活用の事例を示し、事業者の保全活動をバックアップしたい。（例：JANSI データ分析の参考情報としても

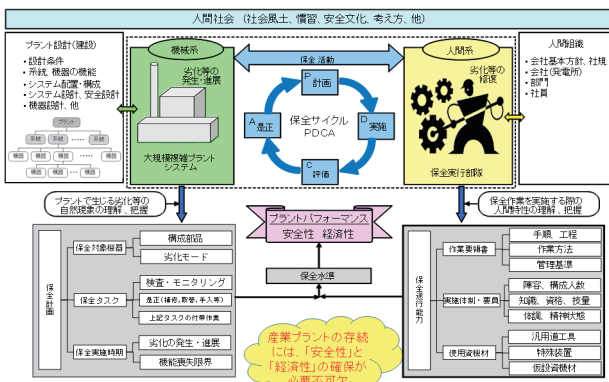


Fig. 1 保全の構造

活用可能とする等)

- 本 WG の成果は、現場レベルでの経験に基づく保全活動の支援、特に電力若手やこれから事業者として活躍する方々のガイドとして活用したい。数理モデルの説明は難しくなりがちであるが、ここでは厳密性よりも分かりやすさを優先するようにしたい。
- これにより事業者は数理モデル適用に自信を持ち、自主的かつ信頼性と経済性のバランスの取れた保全活動を更に推進することが可能となる。

3. 保全における数理モデル活用例調査

本 WG では、保全活動において数理モデルを活用した例を調査している。調査の現況を表 1 (次ページ) に示した。

4. 各数理モデルの特徴と活用状況

ここでは表 1 に示した数理モデルのうち、ベイズ統計、標本統計、モンテカルロ法及び荷重・強度係数設計法 (LRFD 法) を取り上げ、その特徴と活用例について述べる。

4.1 ベイズ統計の特徴と活用例

統計には確率を頻度の極限として捉える頻度論的統計 (標本統計) の他に、確率を確信の度合として捉えるベイズ統計がある。標本が必須で大量のデータがある方が有利である前者に比べて、標本が必須でなく、少ないデータでも推定・更新が可能なベイズ統計は、部品の交換頻度の推定や、信頼度要求に基づく検査計画の立案、検査間隔の合理化等、保全の分野における各種の応用が考えられる。

ベイズ統計は、確率分布の母数 (パラメータ) に対して、条件付確率を計算するベイズの定理をあてはめたものである (ベイズ推定)。パラメータに対し仮定した事前分布に、観測に基づくデータである尤度を乗じることで事後分布を得、これを繰り返すことで多数の標本を有する場合の最尤推定の結果に近づけることができる (ベイズ更新)。

ベイズ統計の活用例としては、以下のようなものが挙げられる。

(1) 消耗品の交換頻度の予測

事後保全を取り入れている消耗品の交換頻度をベイズ推定し、予備品の個数の合理化することを目的とし、単位時間当たりの消耗品の破損

頻度は時間に依らず一定と仮定し、破損頻度のカタログ値を出発点としてベイズ更新により破損頻度を推定する。この際、事前分布として尤度に用いるポアソン分布に対する共役事前分布であるガンマ分布を用いると、事後分布も同じガンマ分布で表され計算が簡単になる。この結果、図 2 に示す通り、既存の知見である破損頻度のカタログ値を活用しつつ、破損頻度の推定値はベイズ更新を重ねるごとに標準偏差が小さくなり、最尤推定の結果に近づいていくことがわかる。これにより、消耗品の交換頻度を合理的に行うことが可能である。なお、この例は本 WG にて検討したものである。

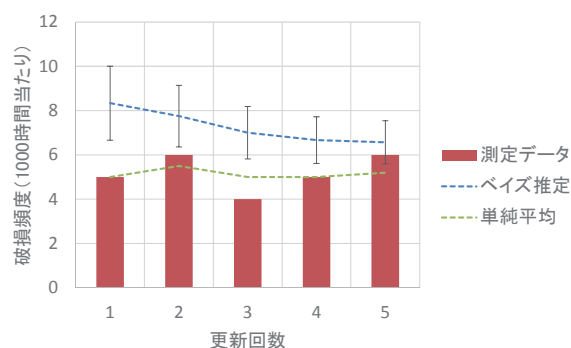


Fig.2 ベイズ更新による消耗品破損頻度の計算例

(2) 輸送機与圧胴体の検査計画の検討

板垣ら[1]は、輸送機の与圧胴体を対象に、ベイズ推定に基づく検査計画を検討した。具体的には、損傷許容・フェールセーフ設計を適用したアルミ合金製の外板と複数フレームから成るリベット継手構造を対象とし、設計経験に基づき作成した真実モデルを用いて、ベイズ推定の有効性を検証した。真実モデルは、疲労亀裂発生が 2 母数ワイブル分布に従うと仮定し、Paris 則に基づく疲労亀裂進展評価と破壊評価を実施し、作成した。

この真実モデルに対するベイズ推定モデルを構成するため、発見可能な疲労亀裂発生を 2 母数ワイブル分布に従うと仮定し、Paris 則に準じ検査データをパラメータとした疲労亀裂進展評価式を仮定して疲労き裂発生前後の破損率、信頼度を計算した。

この信頼性解析結果に基づき、ベイズ推定により要求信頼度を維持できる検査スケジュールが作成可能であることを示した。

Table 1 保全における数理モデルの活用例

数理手法の目的	内容	使用する数理モデル	保全高度化への適用	適用できる系統・機器	実機適用例	適用条件・適用限界	発展可能性
保全実施時期・内容変更判断の支援	少ない信頼データに基づく適切な保全時期の変更の方向性の明示 (一般論)	ベイズ統計	点検周期伸延 故障発生時の低減 保全内容の変更	動的機器一般 (DG 電動ポンプ、電動弁、モータ、A0弁等)	経年劣化情報や誤信号の発生確率を加味することにより、診断精度の向上を目指す。	実機の故障に関してその様態、頻度を分析するとともに、他産業の事例や研究成果を導入し、ベイズ統計等の統計的手法を用いて、保全の有効性評価に反映することが望ましい。その結果を、故障低減、点検周期延伸につなげる。	信頼性・経済性の両立を目指す保全重要度が、信頼性の発展の可能性がある。
	劣化の見逃しリスクだけでなく、誤診断による不要な設備の更新リスクも考慮した診断技術の有効性評価手法の提案	ベイズ統計	診断技術の有効性評価	一般	—	サンプルデータを用いた手法の説明のみされており、実データを用いた検証が必要	誤診断による不要な設備更新の低減による保全コストの合理化が期待される。
	情報量が乏しい初期段階において、専門技術者の経験や実績等の主観データを用いることにより統計的劣化予測診断手法を適用するための方法	ベイズ統計	初期に蓄積情報が不足する場合にはにおける統計的手法の活用による検査の合理化方法	一般	—	サンプルデータを用いた手法の説明のみされており、実データを用いた検証が必要	これまででの知見や隠れた点検結果を有効活用して点検間隔の合理化につなげられる可能性がある。
現状保全の妥当性検証の簡業化	補修前後の点検データから補修効果の事後評価を実施 (高速道路の橋梁RC床版目視点検データの評価)	マルコフ連鎖モンテカルロ法による階層ベイズ推計法	・補修の補修工法が適用できる場合の経済性を含めた適切な点検の選定 ・補修の劣化モードと荷重条件を有する消耗部品の点検周期の最適化	・土木建築構造物、屋外設置機器の基礎 ・複数の劣化モードと荷重条件を有する消耗部品	土木分野での検討であり、原子力発電所での検討無し	・土木部門でも検討段階と想定される。検証要 ・補修工法毎の補修後点検データの蓄積 ・劣化モードと運転条件、荷重条件ごとの劣化速度データの蓄積	原子力発電所においても、補修・予防保全後の検査の考え方を検討中であり、リスクの考慮という観点で参考になると考えられる。
	保全対象機器の損傷モードに係る影響因子のばらつきを考慮して、設計係数の適正化を行う	モンテカルロ法 (実験計画法音)	保全適用への検証簡素化 設計裕度の点検周期延伸等への振り分け	炉内構造物 (実績あり) 容器、配管等 (一般化可能)	炉心シミュレーションにおける安全係数を適正化し炉内構造物等点検評価ガイドラインに反映した	モンテカルロ法によるばらつきの評価を構造モデル試験により検証した	
	機器の未点検範囲における損傷の程度を既点検範囲における損傷割合を基に推定する	故障率 (二項分布)、仮説検定	保全適用への検証簡素化 点検評価の適正化による点検周期延伸等	炉内構造物 (実績あり)	炉内構造物 (実績あり)	炉心シミュレーションにおける未点検範囲の点検存在割合の規定を適正化し炉内構造物等点検評価ガイドラインに反映した	提案方法を基に点検結果に基づき妥当性を検証した
裕度の適正化	信頼性工学 L R F D	信頼性工学 (限界状態関数による破損確率の評価等)	信頼性工学に基づき定義される荷重・強度安全係数を規格に用いることで、設計・維持における構造物の健全性に関する裕度を適正に設定することができる。	原子力発電所設備の静的機器一般	建設分野での指針化 未点検範囲の点検存在割合の規定を適正化し炉内構造物等点検評価ガイドラインに反映した 建設分野での規格の技術的背景として役立っている。 供用期間中検査結果を受けた点検評価にRFIDの手法を適用した評価例がある。	建設分野では1998年の建築基準法の性能規定化に向け建築学会が建築物の限界状態設計指針を刊行した。 米国石油協会規格API579では維持規格による減衰管理が行われており、LRFDは規格の技術的背景として役立っている。 供用期間中検査結果を受けた点検評価にRFIDの手法を適用した評価例がある。	LRFDは一種の設計裕度の全体管理と強度配分を定量化できる手法であり、これを応用することで、いわゆるシミュレーション化規格概念に基づき規格の実用化が期待される。

(3) 配管減肉に関する破損確率評価手法の開発

岡島[2]は、ベイズ推定に基づく配管減肉に関する破損確率評価手法の開発を行った。

残存肉厚は、初期肉厚から減肉量を引いたものであり減肉量は減肉速度と供用期間の積で表される。ここで初期肉厚、減肉速度の確定値は不明だが公称肉厚と公差、類似現象からの推定等、限られた情報が存在する。このため、主観的な確率分布（事前分布）を与えてベイズ推定を行った。二変量正規分布を考慮した事前分布を設定し、検査を実施し、ベイズ推定により事後分布を算出する手順に基づき、検査頻度に応じた検査間隔の合理化が可能になるとした。

4.2 標本統計の特徴と活用例

標本統計では確率を頻度の極限として捉えるため標本が必須であり、データが多いほど高い精度が得られるが、データが少ない場合は不確実性が大きく注意が必要である。

筆者の一部は、標本統計の考え方に基づき、炉心シュラウドの欠陥評価における未点検範囲の欠陥存在割合の規定を適正化し、JANSI 炉内構造物等点検評価ガイドライン（以下、炉内 GL という）に反映した[3]。

維持規格、炉内 GL では検査していない範囲（以下、未点検範囲）には貫通欠陥を想定することとしている。この方法は未点検範囲が比較的多い場合には過度に保守的となるため、図3に示すとおり、点検範囲と同じ欠陥割合と仮定するケース1と、図4に考え方を示す標本統計的手法のケース2を考慮し未点検範囲に対する欠陥想定手法を検討した。図3でcは点検範囲に見つけた SCC の割合を、fは全点検対象範囲における SCC 割合を表す。ケース2の推定方法に基づき炉内 GL における未点検範囲の欠陥割合想定法を図5の折線のとおりを設定し、その妥当性を図6に示すとおり実機データとの対比により検証した。

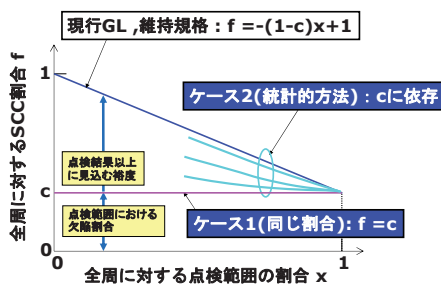


Fig. 3 推定手法ごとの SCC 割合

ケース2：点検欠陥比率より全体のSCC割合を統計的に推定

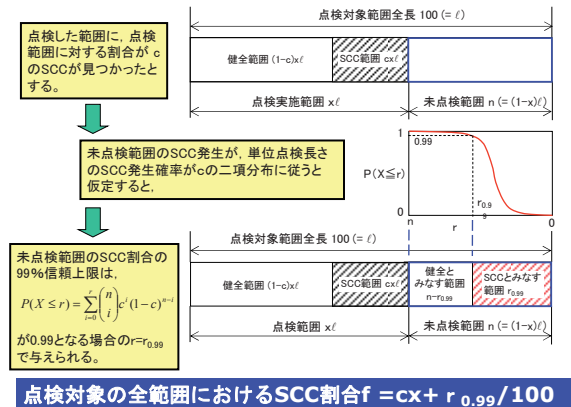


Fig. 4 ケース2の推定方法

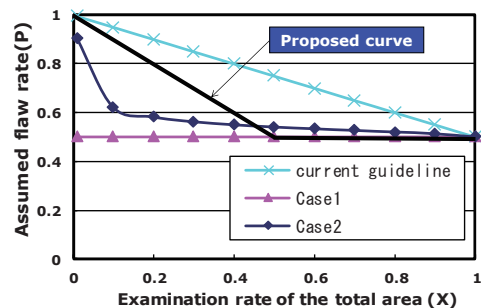


Fig.5 ケース2の方法に基づく規格化の検討

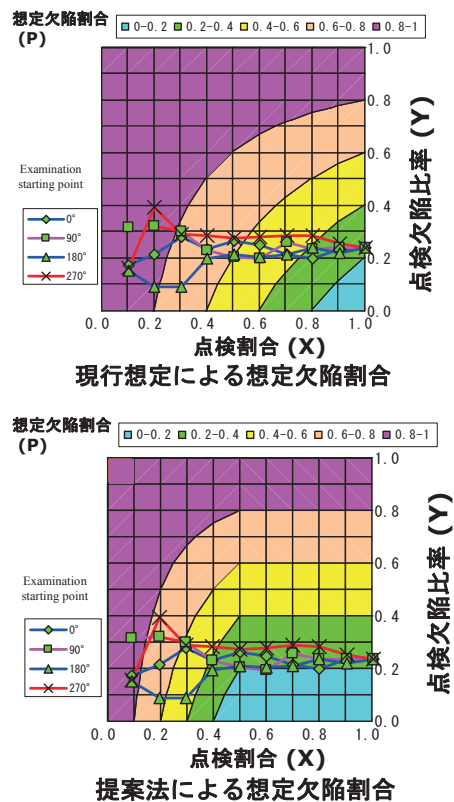


Fig.6 実機データとの比較による検証

図 6 は実機炉心シュラウドの点検実績のうち点検割合が 100%で、亀裂が全周に分布していたものについて、点検を 0°、90°、180°、270° の位置から開始して時計回りに点検を行ったと仮定した場合の各ケースの点検欠陥比率の推移を示したものである。点検割合が 50%を超えると想定欠陥比率は点検開始点によらずほぼ一定だが、点検割合が 30%以下では想定欠陥比率はばらつきが大きい。総じて、従来想定に比べ提案法の方がより現実的な想定欠陥割合の値を示すことを確認し、提案法を炉内 GL に反映することができた。

4.3 モンテカルロ法の特徴と活用例

モンテカルロ法は乱数を発生させて行う数値計算であり、解析的に解くことが困難な問題を単純に扱うことができるが、十分な精度を得るためには膨大な計算を必要とする。

維持規格の炉心シュラウド、シュラウドサポートに対する欠陥評価法では二倍勾配法を採用しており、亀裂のない場合に対する設計・建設規格の方法と同一でありながら供用状態 D における安全係数は設計・建設規格では 1.11 (1/0.9)、維持規格では 1.5 と維持規格の方が大きい。これでは、建設時には成立した構造が供用開始したとたんにならなくなる可能性がある (図 7 参照)。

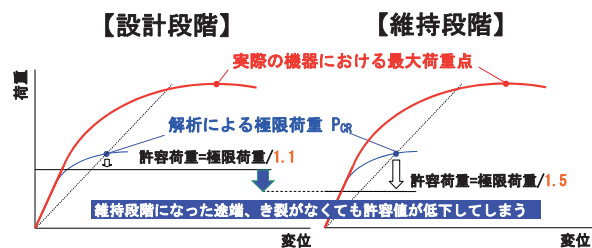


Fig.7 設計と維持の規格における安全係数のずれ

設計・建設規格、維持規格ともに、損傷モードとして座屈または塑性崩壊を想定し、同じ二倍勾配法を適用していることから、亀裂が大きくなれば残りリガメントの面積が減少し耐力は自然に低下するので、設計・建設と維持で安全係数を変える必要はないと考えられる (図 8 参照) [4]。

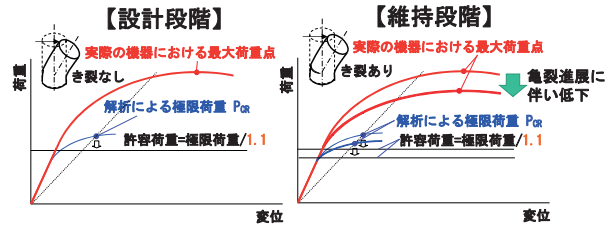


Fig. 8 設計と維持での安全係数のあるべき姿

この考えを検証するため、筆者の一部は、まず、き裂を有する炉心シュラウドを模擬した全周切欠き付円筒試験体を同寸法で複数 (4 体) 製作し、単調負荷による破壊試験を行い、ばらつきを把握した (図 9 参照) [5]。

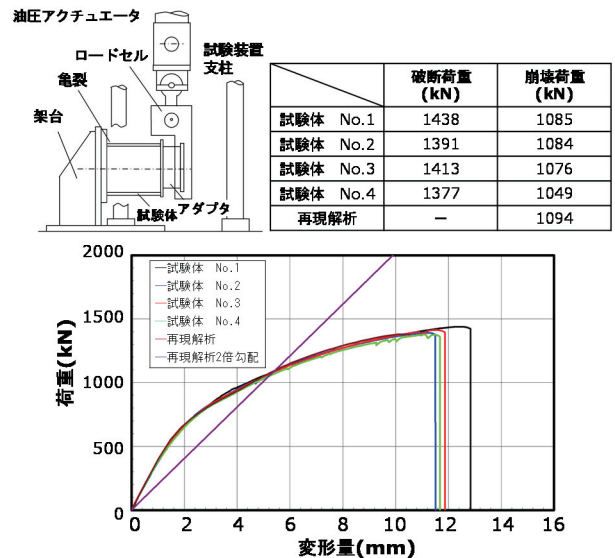


Fig. 9 同寸法複数試験体によるばらつきの把握

その上で、現行評価法の有する安全裕度を定量的に把握 (図 10) するとともに、崩壊荷重に影響を与える因子のばらつきを考慮したモンテカルロ法を活用した検討を行った。

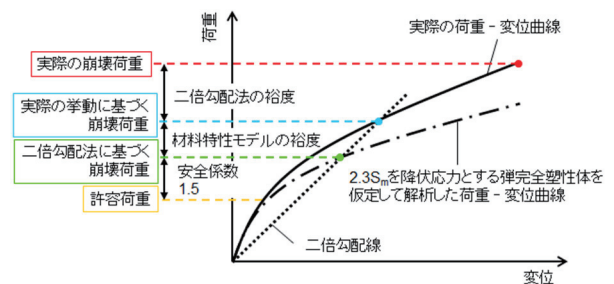


Fig. 10 現行評価法の安全裕度

図 11 は、ばらつきを考慮した炉心シュラウドに対する安全係数の合理化検討の流れを示したものである。図中に記載の多数回の FEM 解析を「実験」と見なして実験計画法を適用し推定式を作成した。

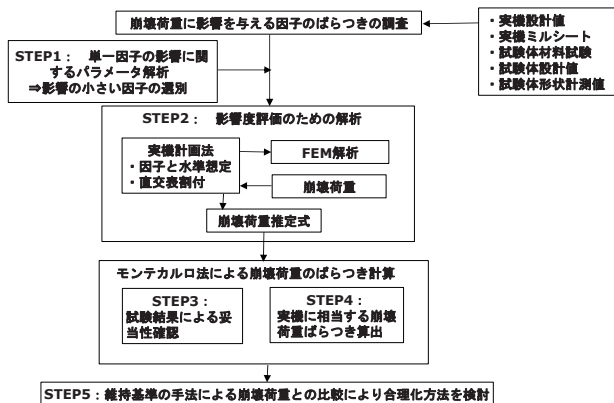


Fig. 11 ばらつきを考慮した安全係数の検討フロー

さらに、すべての諸元サンプルに対して FEM 解析を適用すると計算回数が膨大になるため、図 12 に示すとおり、品質工学の分野で用いられる実験計画法及び応答曲面法をモンテカルロ法に組み合わせた統計的構造信頼性評価法を開発した[6]。

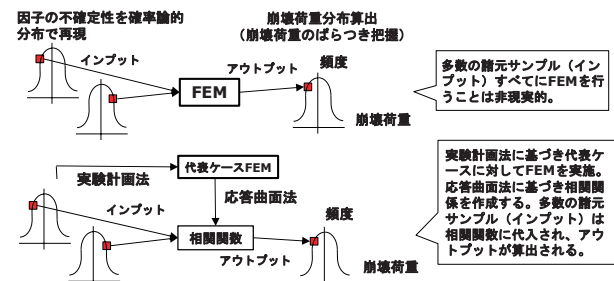


Fig.12 統計的構造信頼性評価法の概念

図 13 に示すとおり、相関関数を用いたシュラウド模擬試験体の諸元をインプットとしたモンテカルロ計算結果とシュラウド模擬試験結果を比較し評価法の妥当性を検証した。この提案は炉内 GL に反映することができた。

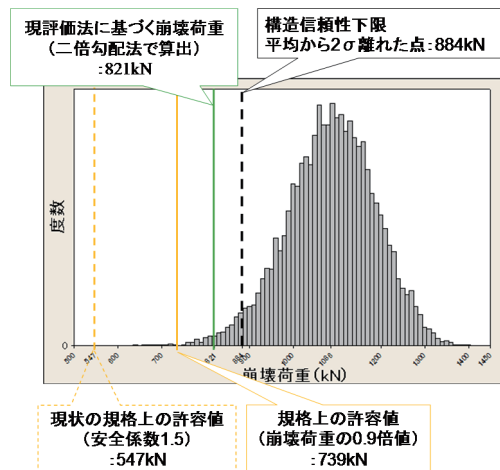


Fig. 13 モンテカルロ計算結果による妥当性検証

4.4 LRFD 法の特徴と活用例

荷重・強度係数設計法 (LRFD 法) では、信頼性工学に基づき定義される荷重・強度安全係数を規格に用いることで、設計・維持において構造物の健全性に関する裕度を適正に設定することができる。すなわち、限界状態関数による破損確率の評価と結び付けられた信頼性指標を用いて荷重、強度それぞれのばらつきを考慮して、要求信頼度を満足する設計係数を付与することができる。

建築分野では、1998 年の建築基準法の性能規定化に向け、建築学会が建築物の限界状態設計指針を刊行した。

機械製品については、米国石油協会規格 API579 では維持規格による減肉管理が行われており、LRFD は規格の技術的背景として役立っている。また、非原子力分野ではあるが、压力容器及び配管の供用期間中検査結果を受けた欠陥評価に LRFD の手法を適用した評価例がある。近年、LRFD 法は一般機械製品を対象に JIS 規格化された[7]ほか、日本機械学会基準としても刊行されている[8]。

将来は原子力発電所設備の静的機器一般への適用が考えられる。また、LRFD は一種の設計裕度の全体管理と裕度配分を実現化できる手法であり、これを一般化することで、いわゆるシステム化規格概念[9]に基づく規格の実用化が期待される。

5. まとめ

機械系と人間系からなる保全の構造の中における様々な活動のひとつとして、保全の判断をバックアップするための数理的手法(数理モデル)の活用に関する意義をまとめるとともに数理モデルの適用状況を調査している。具体的な適用例としては、ベイズ統計、標本統計、モンテカルロ法及びLRFD法を挙げ、それぞれの特徴と適用例をまとめた。主に若手の保全関係者には、これらを参考に、自主的かつ信頼性と経済性のバランスの取れた保全活動を展開するための道具として、数理モデルの積極的な活用を期待したい。

謝辞

ベイズ統計に関する調査に当っては、本WGメンバーの基礎理論の習得のため、原電エンジニアリング株式会社の野崎拓馬氏にご尽力頂いた。

参考文献

- [1] 板垣ら、ベイジアン信頼性解析を適用した非定期構造検査に関する研究、平成8年5月、日本造船学会春季講演会
- [2] 岡島、ベイズ推定手法に基づく機器破損率簡易評価手法に関する研究、平成19年12月、東京大学博士論文
- [3] 堂崎ら、円筒形炉内構造物の欠陥評価における未点検範囲に対する欠陥想定手法の検討、日本機械学会 M&M 2007
- [4] 堂崎、軽水炉における炉心シュラウド破壊評価に対する信頼性評価検討事例、日本機械学会 2017年度年次大会講演論文集 No.17-1
- [5] Mitsuhashi, T., et al., “Development of Rational Integrity Evaluation Method for Core Shroud with Cracks (1. Fracture Testing of Small Scale Mock-ups)”, M&M2013-OS1412
- [6] Ebato, S., et al., “Development of Rational Evaluation Method for Core Shroud with Cracks (2. Development of Statistical Structural Reliability Evaluation Method Combined with DOE and Monte Carlo Method)”, M&M2013-OS1413
- [7] JIS B9955 (2017)「機械製品の信頼性に関する一般原則」
- [8] 日本機械学会基準 S018「部分安全係数法を用いた機械製品の信頼性評価に関する指針」

- [9] Asayama, T. et al., “Implementation of Reliability Evaluation into JSME Fast Reactor Codes (1) Current Status and Path Forward”, ICONE24-60936.