

令和元年6月18日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06953

研究課題名(和文) 検証と妥当性確認(V&V)のための確率論的破壊力学解析基盤システムの構築

研究課題名(英文) Development of Analysis Basis System of Probabilistic Fracture Mechanics for Verification & Validation

研究代表者

関東 康祐 (Kanto, Yasuhiro)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授

研究者番号：60177764

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、原子力機器の安全性評価のために用いられる PFM(確率論的破壊力学)に適した解析基盤システムの構築を目的としている。原子力分野の過酷事象では実験による妥当性確認ができず、ラウンドロビン解析などで複数のソフトウェアの解析結果を比較することが広く行われている。3年間の研究期間において、(1) Option パターン、あるいは他のデザインパターンの適用性、(2) 既存ラウンドロビン問題の解析による本システムの拡張性、(3) ハードウェアへの適用性についての研究を実施した。これらの研究成果は、国際会議4件、国内学会2件で発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、有限要素法ソフトウェア開発のために提案されたOptionパターンの確率論的破壊力学ソフトウェアへの適用性について検討したものであり、機能拡張が必要な様々な工学分野の解析ソフトウェアに有効であることを初めて示した。

ラウンドロビン解析は、原子力分野で期待されている確率論的破壊力学ソフトウェアの妥当性を評価する重要な方法であり、これに適した基盤ソフトウェアの開発は、多数のソフトウェアの妥当性を示すために大きく貢献できると言える。

研究成果の概要(英文)：This study aims to construct an analysis basis system suitable for PFM (Probabilistic Fracture Mechanics) used for safety assessment of nuclear equipment. The importance of verification and validation (Verification & Validation) has been pointed out in simulation software for the purpose of improving reliability and quality assurance, but in severe cases in the nuclear field, experimental validation can not be performed and It is widely used to compare analysis results of several software by Round Robin analyses. During the 3-year research period, (1) Applicability of Option pattern or other design patterns, (2) Scalability of this system by analysis of existing Round Robin problems, (3) Research on applicability to hardware were carried out. These research results were presented at four international conferences and two domestic conferences. In the future, we plan to tackle more practical issues while incorporating the functions of major software in the US and Japan.

研究分野：計算力学、破壊力学

キーワード：確率論 破壊力学 オブジェクト指向 デザイン・パターン

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

地震力や想定外事象による不確定入力に機器やプラントに与えられたとき、その破損確率を評価することは合理的設計・安全評価にとって重要である。特に、既存の原子力発電所や実用化されていない新型炉（高速炉、熔融燃料炉など）では、評価すべき事象、入力条件などが広範囲にわたる事が予想される。既存の破損確率解析ソフトは需要が少ないこともあって、扱う事象ごとに個別に作成されているが、これでは、異なる事象に対応するソフト開発コストが増大し、ソフトごとの精度評価などが適切に行われなくなる。

シミュレーション・ソフトウェアにおいてその信頼性向上・品質保証のため、検証と妥当性確認（Verification & Validation）の重要性が指摘されている。検証はソフトウェアの数学モデルと計算結果の一致を示すことであるが、妥当性の確認は現実世界への適用性を定量的に示すことであり、主に実験等で示すことになる。しかしながら、事象自体がきわめて希でその影響が大きい原子力関連機器に適用される PFM 解析ソフトウェアでは実験による妥当性の確認は困難であり、これを補う方法として、同一問題を比較するラウンドロビン解析が広く行われている。しかし、異なるソフトウェアを用いた解析結果の比較はそれぞれが異なる目的のために開発されたものであり、得られた結果の差異が何に起因するかを特定することは困難なことが多い。

そこで、本研究では、V&Vのために用いることを前提としたラウンドロビン解析の精度評価に用いることができる解析基盤システムの構築を目的とする。このシステムでは、始めから多くの機能を持たせるのではなく、後から必要な機能をプログラミングを専門としない技術者が容易に追加できることを特徴とする。このためには、以下の3点を満たす必要がある。

- (1) 既存ソースプログラムの修正を必要としない
- (2) 独立に追加した機能が既存機能と組み合わせて使用できる
- (3) 追加機能がシステム全体にわたらず、一ヶ所で記述できる

申請者は、CAE ソフトウェアのオブジェクト指向開発について20年以上の経験があり、講演発表[1-2]、著書[3]、科研費基盤研究(A)獲得[4]およびその成果の論文[5]などの成果を挙げている。

さらに、Option デザイン・パターンを提案し、CAE ソフトウェアを例題として、上述の3点を満足しつつ、機能追加が出来ることを示した [6]。

また、申請者は PFM 解析手法およびラウンドロビン解析に関する論文を執筆し、日本・韓国・台湾の研究者からなる国際ラウンドロビンプログラムの中心的役割を担っている。これらの経験から、米国 NRC が開発した解析コード FAVOR や日本原子力研究開発機構が開発した PASCAL などのソフトウェアだけでは、高レベルでの精度評価には不十分であるとの考えから、この研究を着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究は、原子力機器の安全性評価のために用いられる PFM（確率論的破壊力学）に適した解析基盤システムの構築を目的としている。シミュレーション・ソフトウェアにおいてその信頼性向上・品質保証のため、検証と妥当性確認（Verification & Validation）の重要性が指摘されているが、原子力分野の過酷事象では実験による妥当性確認ができず、ラウンドロビン解析などで複数のソフトウェアの解析結果を比較することが広く行われている。ここで得られた差異が妥当なものであるかどうかを判断することはきわめて難しく、PFM 解析に必要な機能をプログラムの専門家ではない技術者が容易に追加・保守ができる基盤システムの開発が必要である。

3. 研究の方法

具体的な目標として、次の3つが挙げられる。

(1) Option パターン、あるいは他のデザインパターンの適用性

申請者が提案する Option パターンの適用性を、他のデザイン・パターンと比較しながら、ラウンドロビン解析に必要なさまざまな種類の機能追加に対して調べ、その適用性を明らかにする。初年度は、Option パターンを PFM 基盤システムに適用し、基本機能の実装を行うが、ソフトウェアのポータビリティと実行速度を考慮して、開発言語は C++ を用いる。現在の実装は非常に単純なため、複数の機能の組み合わせに対して、何らかの制限を設定する必要があることが予想される。まずは、確率計算のためのモンテカルロ法の高速度手法の追加などを行い、基本機能の確認を行う。これらの追加機能に対して、自由に組み合わせたり、指定の順番を変えてみて、不具合が発生しないか確認する。

(2) 既存ラウンドロビン問題の解析による本システムの拡張性

(1) で構築された基礎的システムを用いて、これまで多く行われている既存ラウンドロビン問題の解析を行い、プログラムの違いによる結果の差異がどのような原因で現れているかを考察する。これを通して、実用的な問題に本システムが適用できるかどうか、機能の拡張がスムーズに行われるかどうかを確認する。日本溶接協会原子力研究委員会 PFM 小委員会（確率論的破壊力学の適用法に関する研究小委員会）では、20 年以上に渡り PFM の調査・研究を行っているが、多くのラウンドロビン解析を行い、その知見の蓄積が行われている。第2年度は、これらの問題に対し、本システムが適用可能であり、ラウンドロビン解析が行われた時点では明らかにされなかったプログラムや入力データの違いによる破損確率の差異の原因について考察する。

第2年度で研究実施上問題となる可能性があるのは、選択した解析問題に必要な機能の実装に時間がかかり、多くの解析が行えない、という恐れがあることである。この場合には、対象となる問題を重要性・網羅性の観点から絞り込む必要があると考えられる。

(3) ハードウェアへの適用性

本研究の成果はフリーソフトウェアとして公開するため、さまざまなハード上で機能することが必要である。特に、並列計算による高速化で注目されている GPGPU (計算目的のための汎用グラフィック処理ボード) への適用性が重要であると考えている。GPGPU を複数搭載した複数ワークステーションからなる PC クラスタへの適用性を調べることは、独立に追加された機能を組み合わせる課題として、非常に高度なものと考えられ、本研究の重要なターゲットとなる。最終年度は、様々なハードウェア環境での実行可能性や実行性能の確認のため、PC クラスタおよび GPGPU を用いた並列計算機環境への適用性について考察する。本研究の主目的には計算の高速化は含まれていないが、ある程度大規模な解析を行わなければ精度の良い結果は得られず、明らかに出来ない問題も存在する。PFM 解析は、もともと並列解析に向いていると言われている。モンテカルロ法でのサンプリングがそれぞれ独立に計算することができるからである。PC クラスタによる高速化についてはすでに周知であるが、この種の問題に対する GPGPU による高速化については、情報はきわめて少ない。グラフィックボードに搭載されているメモリーが限られているため、ある程度の制限が存在することが予想される。ここでは、それぞれの並列化による高速化、およびその限界について考察する。

4. 研究成果

(1) プログラムの基本設計

PFM 応用分野の拡大に伴い、汎用的なソフトウェア開発が望まれるが、PFM 解析ソフトウェアの特徴として、解析手法、評価手法、およびデータが多種類にわたり、なおかつそれらを効果的に組み合わせなければならない。また、新しい手法やデータを容易に追加できるようになっていなければならない。

これらの要求を満たし、なおかつインターネットを有効に利用して多機関による共同開発に対応したプラットフォームの構築を目指す。基本設計の概略を図1に示す。

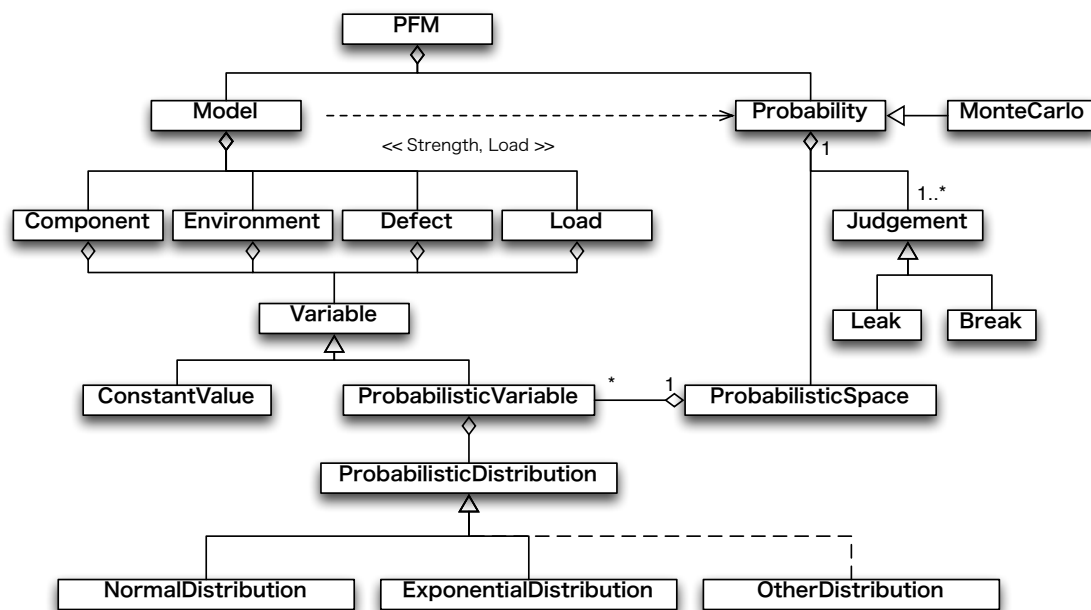


図1 PFMプログラムのクラス図

プログラムは大きく分けて、解析対象を定義する Model クラス群と確率計算を行う Probability クラス群に分かれる。Model クラスは部材 (Component)、環境 (Environment)、欠陥 (Defect) および荷重 (Load) からなる。Component クラスは容器や配管などの形状定義、材料定義を行う。Environment クラスは、中性子照射量や温度、腐食環境などを定義する。Defect クラスは欠陥の種類や寸法などの定義を行う。Load クラスは外荷重や熱荷重などの定義を行う。これらのクラス内の定義には様々な定数や確率変数が必要となるが、これらはすべて Variable クラスを用いて記述する。このクラスはさらに、定数 (ConstantValue) クラスと確率変数 (ProbabilisticVariable) クラスの2つに分かれる。確率変数クラスは確率分布 (ProbabilisticDistribution) クラスを有し、値を参照されるたびにその確率分布に従った乱数を返す関数が定義される。

Model クラスの様々なパラメータの入力の際、定数か確率変数かを指定し、問題の定義とする。

確率変数として入力されたパラメータは自動的に確率空間(ProbabilisticSpace)クラスに登録され、確率計算はこの空間内で行われる。確率空間の次元数は入力された確率変数の数となる。

確率計算(Probability)クラスはこの確率空間を用いて破損確率を計算するが、その手法を選べるように設計しておく。とりあえずは Monte Carlo 法を実装するが、今後、高速化手法の実装を行っていく。破損判定は Judgement クラスで行う。複数の破損確率を同時に計算できるように、複数の Judgement クラスを登録できるようにする。基本的には漏洩(Leak)と破断(Break)を実装しておく。

(2) 機能拡張への対応

非常に単純な機能のみを実装したプラットフォームの原型は完成したが、今後ここに様々な機能を追加していかなければならない。ソフトウェアの機能追加は単に新しいソースコードを付け加えるだけでなく、既存のプログラムも変更しなければならないのが普通である。しかしながら、そのような方法で機能拡張を続けると、追加機能同士がバッティングを起こし、すでに追加されている機能が不具合を起こしたり、不具合の原因を特定することが難しくなったり、様々な問題が発生する。そこで、これらの問題を回避するために提案された Option パターン[6]を用いた機能追加法の適用を試みる。

Option パターンは機能拡張に関わる問題に対処するため、(1) 既存プログラムの変更を行わない、(2) 追加機能同士を自由に組み合わせることができる、(3) 機能追加を一つの場所に限定して行う、という3つの特徴がある。(3)の「一つの場所」について説明を加えておく。通常一つの機能を追加するためには、プログラムの様々な部分の変更が必要になる。少なくとも、新機能に必要なパラメータの入力、新機能の計算、新機能に関わる結果出力、の3箇所の変更は必要となる。計算についても、通常は1箇所だけの変更ではならず、プログラムの色々な部分での変更が必要になる。Option パターンはその変更を1箇所(一つのソースファイル)で実現するものである。

実際の実装方法は、まず、オブジェクト指向言語(ここではC++)で、必要最小限のプログラムを作成する。次に、全ての関数を Option パターンで機能拡張できるように変換する。このプログラムが、後ほどの機能追加があっても変更の必要のない、基盤プログラムとなる。あとは、必要な機能追加を Option パターンを用いて追加していくことになる。

既存プログラムに機能追加を行う方法には、一般的に、前処理追加、後処理追加、そして(できれば、前処理、後処理だけで追加できる方が望ましいが)処理自体の取り替えの3つがある。これを受け付けるようにするため、既存プログラムを以下のコード例1のように変換する。ここでは、既存コードの例として、クラス名:ClassName、関数名:funcName、関数の返り値の型:Typeの関数を考える。引数列は..arguments..と表した。ここで、太字斜体で示している部分に変換によって追加されている部分で、Bodyは元々の関数の処理を表している。optは使用する追加された機能へのポインタであり、複数の機能を組み合わせられるように、チェーンリンクで繋がるようにしている。pre_の接頭辞が付くのが前処理プログラムであり、post_の接頭辞が付くのが後処理プログラムである。replace_の接頭辞が付くのは処理全体を取り替えるプログラムであるが、その返り値がtrueの場合には元の処理Bodyを実行するようにしている。これらのプログラムは、初期設定として何も行わないプログラムを作成しておく。追加機能を作成するとき、これらのプログラムを適宜作成することになる。

コード例 1 Option パターンへのソースコード変換例

```
Type ClassName::funcName(..arguments..) {
    Type retValue;
    pre_ClassName_funcName(opt, ..arguments.., retValue);
    if(replace_ClassName_funcName
        (opt, ..arguments.., retValue)){
        Body
    }
    post_ClassName_funcName(opt, ..arguments.., retValue);
    return retValue;
}
```

(3) 例題解析 (国際ラウンドロビン問題)

① 問題の定義

実用的な問題の解析例として、ASINCOで取り上げられた日台韓・国際ラウンドロビン問題[7]からLTOP(Low Temperature-Over Pressure)荷重を受けるBWRの破壊確率を取り上げる。モデルの簡略化のため、対象は円筒容器ではなく、同じ板厚の平板とした。LTOPの時刻歴[8]を図2に示す。低温状態で急激に圧力が上昇する現象である。

その他、国際ラウンドロビン問題と異なる条件として、破壊じん性値の確率分布を正規分布から国内ワイブル分布型破壊じん性曲線に、脆化予測式をJEAC4201-2004[9]に変更した。

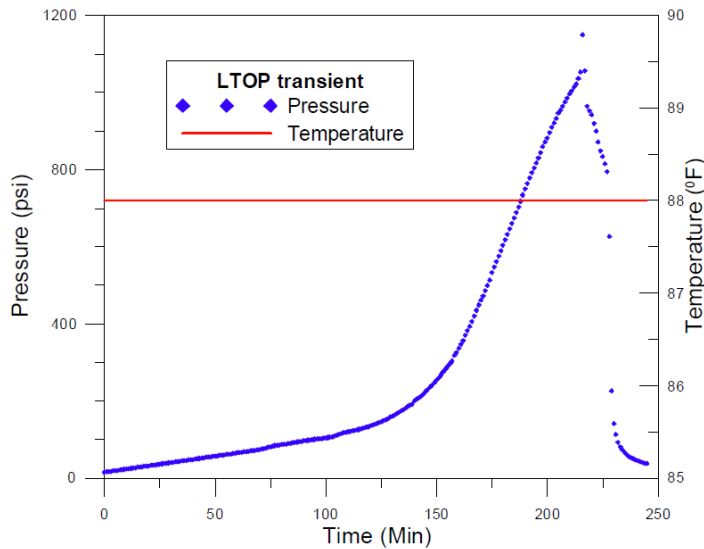


図2 LTOP イベントのトランジェント[5]

② 解析結果

解析結果の一例として、LTOP イベントに対する破壊確率を図3に示す。確率変数は、未照射材の破壊じん性値、 RT_{NDT} の初期値、Cu, Ni, Pの含有量である。確率分布は、破壊じん性値はワイブル分布、他の確率変数は正規分布とした。解析は、モンテカルロ法を用い、サンプル数は1,000,000である。さらに大きなサンプル数の解析も行い、解の収束を確認した。他の研究グループの解析結果も併せて示しているが、本研究での解析結果は比較的大きなマークで表している中抜き四角（母材）と塗りつぶしの丸（溶接部）である。解析条件がいくらか異なっているが、他の解析結果と同レベルの破壊確率と中性子照射量依存性を示していることから、妥当な解が得られていると考えられる。

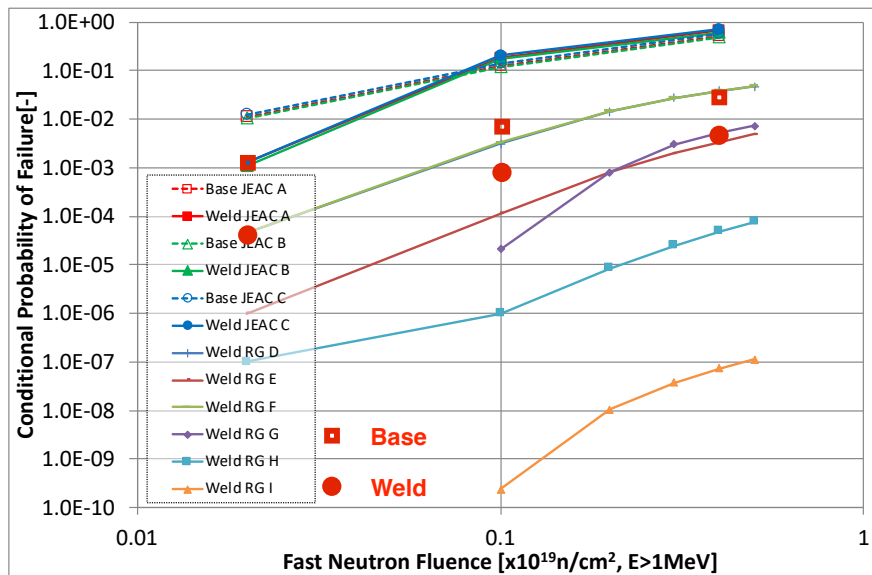


図3 破壊確率の比較

(4) まとめ

汎用的なPFMソフトウェアに必要な機能を考察し、その基本設計を行った。基本的な解析機能を追加し、例題として国際ラウンドロビン問題の一部であるLTOPイベントの破壊確率を求めた。他の研究グループの解との比較を行い、ここで開発されたプログラムの妥当性を確認した。将来的には、多機関で開発分野を分担するような開発形態に対応する機能も考えていきたい。

参考文献

- [1] 関東 他「有限要素解析コード開発におけるクラスライブラリの構築」日本機械学会 69期全国大会講演論文集 No. 910-62A (1991) pp 636-637
- [2] 関東 他「非線形構造解析におけるオブジェクト指向アプローチ」日本機械学会第6回計算力学講演会論文集 (1993) pp 45-46
- [3] 矢川元基、関東康祐著「オブジェクト指向計算力学入門—C++による数値解析プログラミング」、1999、培風館
- [4] 2001年度～2003年度、科学研究費補助金基盤研究(A)「フリーメッシュ法による発展型CAE基盤ソフトウェアの開発」(研究課題番号:13355005) 研究代表者:関東康祐
- [5] 仲間豊、関東康祐、安藤知明、矢川元基、オブジェクト指向設計による並列フリーメッシュ法ソフト開発、日本機械学会論文集A編, Vol.70-689, pp.17-22, (2004).
- [6] Y Kanto and T Kawasumi, Option Design Pattern for CAE Software Development and its Application to Extension of Nonlinear Functions, WCCM/APCOM 2010, July 19-23, Sydney, Australia (Keynote Lecture)
- [7] Y. Kanto, et al., “Summary of Results from Japanese Participants in Round-Robin Analyses by Probabilistic Fracture Mechanics for BWR Pressure Vessel during LTOP event,” The 11th International Workshop on the Integrity of Nuclear Components, April 11-13, 2016, Nagasaki, Japan.
- [8] Hsoun-Wei Chou, et al., “Failure Probability Assessment for Boiling Water Reactor Pressure Vessel Under Low Temperature Over-Pressure Event,” PVP2012-78244, Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Conference, July 15-19, 2012, Toronto, Canada.
- [9] 日本電気協会, 電気技術規程原子力編 原子炉構造材の監視試験方法, JEAC4201-2004, 2004.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 6 件)

1. 関東康祐、Option デザインパターンの適用について、日本機械学会年次大会、2019.
2. Y. Kanto, Development of Basis Program for PFM analysis using OO Design Patterns and its application to the JWES Round Robin Problem, 11th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEFOS2018).
3. Y. Kanto, An application of the Option design pattern to the probabilistic fracture mechanics program, 9th International Conference on Computational Methods (ICCM2018).
4. Y. Kanto, Application of Option Design Pattern to PFM Program, 10th International Conference on Numerical Analysis in Engineering (NAE2017), Invited paper.
5. Y. Kanto, Option Design Pattern for CAE Software Development and its Application to Probabilistic Fracture Mechanics, International Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering (ECM2017).
6. 関東康祐、Option パターンを用いた PFM 解析基盤ソフトウェアの開発、日本機械学会 第30回計算力学講演会 (CMD2017)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。