

# セラミックス構造物設計のための超大規模確率計算

株式会社アライドエンジニアリング ○秋 葉 博

Super Large Scale Computations For Design Of Ceramics Structures

Hiroshi AKIBA Allied Engineering Corporation

## Abstract

In order to predict or to evaluate the structural reliability of a ceramic structure, we calculate the probability of the fracture of the structure based on material properties on the distribution of cracks (mesoscopic theory) by Monte Carlo simulation. Monte Carlo simulation is executed by parallel systems which are on different sites. As the objective ceramic structure, we chose an actual reactor core component of the JAERI's High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR). We have developed the system by which we use several PC clusters through the network.

## 1 緒言

21世紀に解決すべき科学技術上の課題としてエネルギー産業や製造業の高度化があり、それにはエネルギー関連機器や製造物の高性能化・長寿命化・経済性向上などが必要である。特に、高温構造物にセラミックスが従来の金属材料に代わって用いられるようになれば、熱効率の向上などを通じて地球的規模での環境負荷の軽減への寄与は大きい。このためには超高温などの極限的環境をも想定した材料工学、構造力学、計算工学の最新の知見を統合する構造設計・健全性評価手法の開発が不可欠である。本研究開発では、このような背景の下でセラミックス構造物の大規模な確率論的設計・健全性評価のための手法・ソフトウェアを開発した。

セラミックス材料および構造物の設計の最適化や健全性評価に確率論的評価を用いることは、材料特性のばらつきが構造物の挙動に与える影響や外的要因の不確実性の影響などを評価する上で非常に有用である。本研究開発では、セラミックス構造物の確率論的評価を行なう。確率論的評価手法にはモンテカルロ法があるが、大規模有限要素法構造解析をパラメトリックに行なう必要がある。これには膨大な計算コストがかかり、これに対処するため4機関の超並列機をネットワークで接続して行なう。

確率論的評価手法にはモンテカルロ法以外に、3軸応力下の破壊強度理論に基づく破壊確率解析法がある [7]。その理論とそのアルゴリズムによる破壊確率解析コードを開発し、モンテカルロ法による破壊評価と破壊強度理論に基づく破壊評価を比較検討した。

## 2 確率論的構造健全性解析

セラミックス材料および構造物の確率論的健全性評価として、破壊強度理論に基づく破壊確率解析、およびモンテカルロ法による破壊確率解析により、原研高温工学試験研究炉 HTTRの炉心部可動反射体(黒鉛製)の破壊確率解析を実施した。高温照射下における各種構造物に対する性能評価を行なうため、並列計算機対応の確率論的構造解析を目標として粘弾性構造解析ソルバ [1][4] [5][6] および熱伝導解析ソルバを開発した。粘弾性構造解析ソルバは、セルフコンシステントモデルによる弾性定数、ポアソン比の予測法 [2]および黒鉛の結晶子内原子間距離基準モデルによる線膨張係数の予測法に基づく粘弾性解析を行なう。領域分割法にコースグリッド法をとり入れた有限要素法ソルバアルゴリズム CGCG法の開発により粘弾性構造解析ソルバ高速化に成功した。

### 2.1 破壊強度理論に基づく破壊確率解析

3軸応力下の破壊強度理論に基づく破壊確率解析法の理論とそのアルゴリズムについて述べる [7]。本破壊確率

解析アルゴリズムは最弱リンク仮説とワイブル理論に基づく。

き裂状欠陥が破壊を引き起こす指標、あるいはき裂状欠陥の強度を表わす指標として、き裂状欠陥の相当応力強さ $S_E$ を定義する。この定義は、ひずみエネルギー解放率 (strain energy release rate) に基づく。一方、3軸負荷応力 $\sigma$ のき裂状欠陥への効果を表わすものとして $\sigma$ の相当応力 $\sigma_E$ が定義される。 $\sigma_E$ は3軸負荷応力と負荷対象のき裂状欠陥の方向に依存する量になる。

個々のき裂状欠陥を相当応力強さ $S_E$ で特徴付け、単独き裂の危険率 $\dot{G}(S_E)$ を設定する。一方、破壊基準を「 $S_E \leq$  負荷応力 $\sigma$ の相当応力 $\sigma_E$ 」と想定する。単独き裂の危険率 $\dot{G}(S_E)$ をき裂状欠陥の方向および部材全領域に関して足し合わせ (方向積分および空間積分)、破壊の危険率 $R(\sigma)$ を計算し、 $1-e^{-R(\sigma)}$ を全体の損傷確率とする。

単独き裂の危険率 $\dot{G}(S_E)$ には、一般に広く認められているワイブル理論にしたがい単一項べき乗関数を仮定する。このため、一般式には未定の欠陥分布パラメータ $m$ 、 $S_0$ が含まれる。欠陥分布パラメータは材料強度試験で決定される。

## 2.2 モンテカルロ法による破壊確率解析

メゾスコピック材料物性モデルを、マクロスコピック構造健全性解析・評価に次のとおり応用する。物性値の統計的変動 [3] を考慮した構造物の応力解析の直接シミュレーションを行ない、その結果得られる応力分布から、破壊確率を評価する。

モンテカルロ法では、微視的組織の特性値を実験値から得られた分布関数にしたがってランダムに生成させ、その値に対して粘弾性応力解析を行ない、求められた応力分布から破壊するか否かを判定する。モンテカルロ法はネットワーク上で行なう。

## 2.3 計算例

解析対象であるセラミックス構造物として、日本原子力研究所・高温工学試験研究炉HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor) の炉心部可動反射体 (黒鉛製) を用いた。パラメータとして、気孔率、破壊靱性を選んだ。層別サンプリング法を用い、粘弾性解析、破壊評価を行った (図1)。

一方、3軸応力下の破壊強度理論に基づく破壊確率解析法によるHTTR炉心部反射体の破壊確率解析を実施し、モンテカルロ法による解析結果と比較検討した。

仮想的な厳しい温度分布条件の下に、破壊確率  $1.2e-6$  との結果を得た。

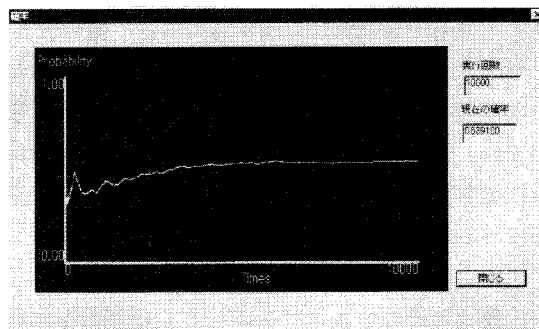


図1 破壊確率画面

## 3 ネットワークの活用について

広域ネットワークを介して、複数機関のクラスタを利用したモンテカルロ計算を行なうためのソフトウェアを開発した。

モンテカルロ計算では、長時間にわたり繰り返し計算が行なわれる。ネットワークを介して実行させた場合の利点として、もし一機関のクラスタ環境に不都合が生じた場合でも、他の機関には影響を与えず、残りの機関のクラスタを用いて計算を続行できる為安定性の面ですぐれている。

操作性を考慮して、WindowsGUIでモンテカルロ実行制御、及び接続されたクラスタの状況の監視がスムーズに行えるよ

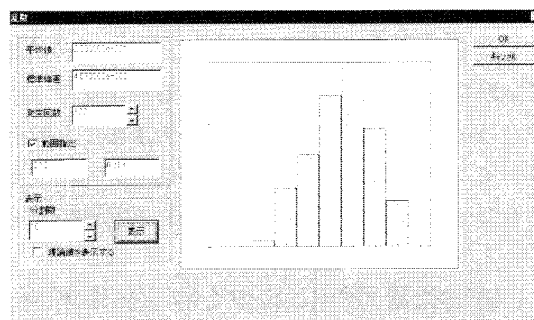


図2 乱数の設定画面

うに、ユーザーフレンドリーなソフトウェアを開発した。変数の値、乱数の発生回数、確率分布などの設定もGUI上で行う（図2）。また、安定し長時間の計算を行う為、GUI上で、指定クラスタの実行の一時中断、再開ができるようにした。

手順は、WindowsGUIからLinuxPC上のサーバーに通信を行い、乱数を発生させ各機関にIMnetを介して送信し、各機関のクラスタマシンにて、並列粘弾性応力解析、破壊判定を行う。その結果をアライドエンジニアリングのサーバーに送り処理を行う。アライドエンジニアリング、九州大学、東京大学、横浜国立大学の4機関のクラスタにアクセスできるようにした。

#### 4 結言

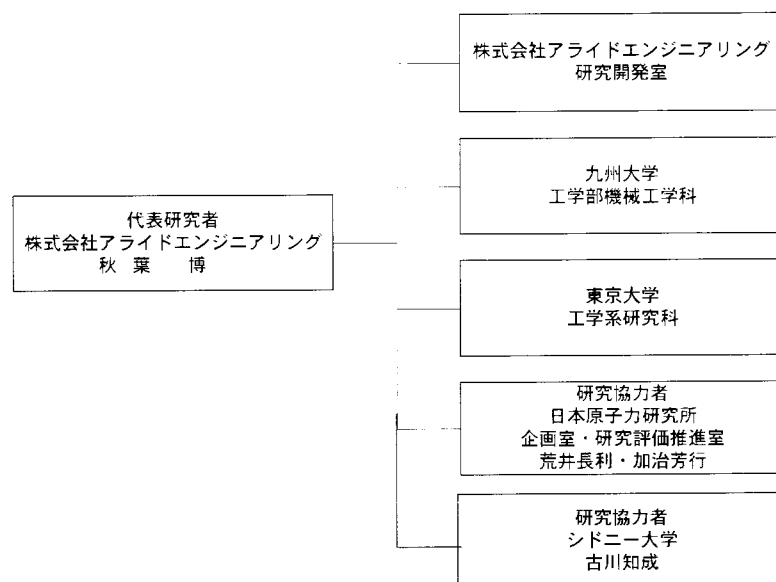
高温照射下における各種構造物に対する性能評価を可能とするため、熱伝導解析ソルバ、CGCG法により高速化した粘弾性構造解析ソルバを開発した。セラミックスのメゾスコピックモデリングでは、セルフコンシステントモデルによる弾性定数、ポアソン比の予測法、黒鉛の結晶子内原子間距離基準モデルによる線膨張係数の予測法を設定した。また、大規模なモンテカルロ法のために、複数機関のクラスタをネットワークを介して利用するシステムを開発した。

メゾスコピック材料物性モデルを対象とした、確率論的なマクロスコピック構造健全性解析・評価として、ネットワークを介した大規模モンテカルロ法により、原研高温工学試験研究炉HTTRの炉心部可動反射体（黒鉛製）の破壊確率解析を実施した。

3軸応力下の破壊強度理論に基づく破壊確率解析法による破壊確率計算コードを開発しHTTR炉心部反射体の破壊確率解析を実施し、モンテカルロ法による解析結果と比較検討した。

#### 5 研究実施体制

研究実施体制は次のとおりである。



## 6 参考文献

- [1] 荒井, 佐藤: 高温ガス炉用多重殻型燃料体も照射に伴う温度および応力変化の解析, JAERI-M 5513, 1974.
- [2] N. Laws and J. R. Brockenbrough: *The Effect of Micro-Crack Systems on the Loss of Stiffness of Brittle Solids*, Int. J. Solids Structures, Vol. 23, pp. 1247--1268, 1987.
- [3] 荒井: 原子炉用黒鉛の静的強度の統計モデルと設計工学, JAERI-M 92-009, 1992.
- [4] 塩谷: *Massively Parallel Computing for Large Scale Finite Elements*, Doctoral Thesis, The University of Tokyo, 1995.
- [5] 大山, 秋葉, 和田, 加治, 荒井, 矢川: 大規模並列粘弾性プログラムのベンチマーク計算による検証, 第12回計算力学講演会, 1999.
- [6] H. AKIBA, M. SUZUKI, R. SHIOYA, H. KANAYAMA, I. ISHIKAWA, Y. KAJI, T. ARAI, S. YOSHIMURA and G. YAGAWA: *Development of An Efficient Parallel FEM Analysis Program for Large Structural Problems Over Several Millions of DOF*, Supercomputing in Nuclear Applications, SNA 2000, 2000.
- [7] J. Lamon, A. G. Evans: *Statistical Analysis of Bending Strengths for Brittle Solids: A Multiaxial Fracture Problem*, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 66, No. 3, March 1983.