

I. 物質・材料分野の研究開発終了報告書

1. 研究開発課題名 セラミックス構造物設計のための超大規模確率計算

1.1 代表研究者 株式会社アライドエンジニアリング 代表取締役社長 秋葉 博

1.2 概要

- (1) 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、高温ガス炉に用いられている黒鉛製炉心構造物の健全性評価に適用する。このため、有限要素法による大規模構造解析コードの開発、弾性応力解析プログラムの開発、熱伝導解析プログラムの開発、メゾメカニクスに基づく3軸応力下の破壊理論の構築と破壊評価プログラムの開発などを行い、これらを基に炉心構造物の健全性評価を行う。

1.3 研究開発実施内容

- (1) セラミックス構造物の健全性評価コードの開発

有限要素法による大規模構造解析コード、3軸応力下の破壊理論に基づく破壊評価プログラム、およびマクロ物性値決定手法に基づく評価プログラムを統合化するセラミックス構造物の健全性評価コードを開発した。

破壊評価プログラムは指定された欠陥分布パラメータに従い、応力分布から評価対象モデル全体の破壊確率を算出する。

マクロ物性値決定手法に基づく評価プログラムは、黒鉛の各座標でそこでの照射量に依存する以下の物性値を算出する機能を持つ。

- ・ヤング率
- ・ポアソン比
- ・せん断弾性係数
- ・線膨張係数
- ・照射ひずみ

有限要素法による大規模構造解析コードに、マクロ物性値決定手法に基づく評価プログラムを組み込み、照射量に依存して空間的および時間的に変化する物性値の下でメゾスコピックな粘弾性解析を行ない、評価対象モデルの応力分布を計算することを可能にした。

応力分布を基に直接決定論的健全性評価、あるいは応力分布および指定した欠陥分布パラメータから、破壊評価プログラムにより確率論的健全性評価を行なうことができる。欠陥分布パラメータは評価対象セラミックス構造物の材料強度試験のデータから決定する。

- (2) 確率論的健全性評価コードの開発

セラミックス構造物の健全性評価コードを用いた確率論的健全性評価コードを開発した。

(1)の破壊評価プログラムを用いる方法とは別の確率論的健全性評価プログラムであり、本コードは微視的組織の特性値を確率変数としてモンテカルロ法により確率論的健全性評価を行なう。これはモンテカルロ法を大規模に効率よく実行するために開発した、複数機関のクラス

タをネットワークを介して利用することにより、モンテカルロ法をネットワーク上で実行するシステムより成る。

(3) 炉心構造物の健全性評価

炉心構造物の健全性評価として、原研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)のモンテカルロ法による破壊確率計算を行なった。

確率論的健全性評価コードを用いて、ネットワークを介して複数の機関にアクセスし、モンテカルロシミュレーションを行った。

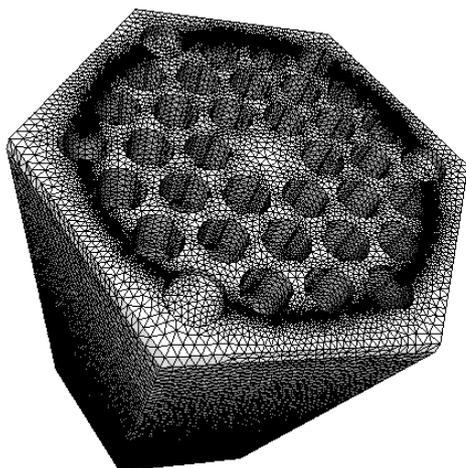
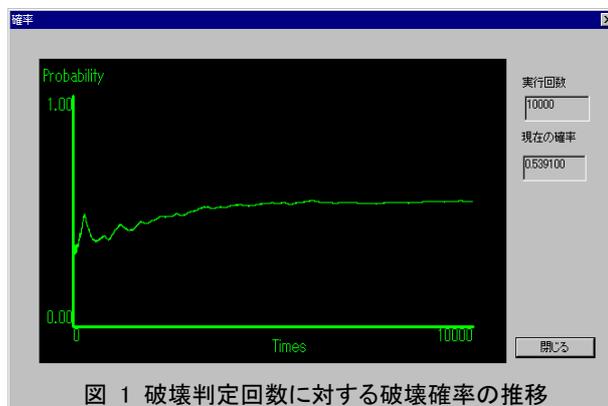


図 2 モデルのメッシュ

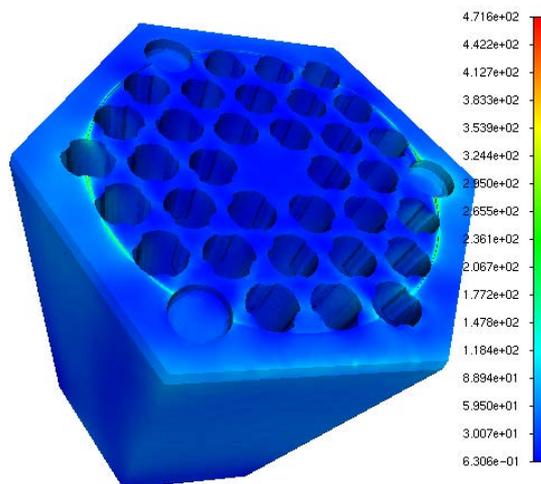


図 3 応力分布

原研 HTTR のモンテカルロ法による破壊確率計算を行なった。メッシュモデルは約 38 万自由度（四面体一次要素）で、条件は照射量 2800 日、時間ステップ 12、基準気孔率、破壊靱性をパラメータとして、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。

一方、3 軸応力下の破壊強度理論に基づく破壊評価プログラムによる 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。

1.4 題目別実施内容

(1) セラミックス構造物設計のための超大規模確率計算（総括担当者名）秋葉博

弾性応力解析プログラム、熱伝導解析プログラム、メゾメカニクスに基づく 3 軸応力下の破壊理論の構築と破壊評価プログラム、メゾメカニクスに基づくマクロ物性値決定手法の構築と評価プログラムを統合化するセラミックス構造物の健全性評価コード用いた確率論的健全性評価コードにより、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) の確率論的健全性評価解析を実施した。

(a)確率論的構造健全性評価の研究 (担当者名) 鈴木正文

・メゾメカニクスに基づく3軸応力下の破壊理論の構築と破壊評価プログラムを開発した。

(b)システム設計・開発 (担当者名) 片井義和、花本雄一、久保田修二、浜水栄太

・マクロ物性値決定手法に基づいた黒鉛のマクロ物性値評価プログラムの開発を行った。

・メゾスコピック材料特性モデルを考慮できる大規模並列粘弾性解析アルゴリズムにより大規模並列粘弾性プログラムを開発した。

・プログラムを統合化したセラミックス構造物の健全性評価コードの開発を行った。

・セラミックス構造物の健全性評価コードを用いた確率論的健全性評価コード、モンテカルロ法をネットワーク上で実行するシステムの開発を行った。

(2) セラミックス構造物設計のためのメゾスコピック解析 (総括担当者名) 荒井長利

メゾスコピック理論のセラミックス構造物設計への応用研究として、メゾスコピック理論に基づいた黒鉛のマクロ物性値決定手法の構築、3軸応力下の破壊強度理論に基づく破壊評価アルゴリズムの検討、メゾスコピック材料特性モデルを考慮できる大規模並列粘弾性解析アルゴリズムの開発を行った。

(a)メゾスコピック解析の研究 (担当者名) 荒井長利

・メゾスコピック理論に基づいた黒鉛のマクロ物性値決定手法を構築した。

(b)破壊強度理論の研究 (担当者名) 荒井長利

・3軸応力下の破壊強度理論に基づく破壊評価アルゴリズムを検討した。

(c)高温ガス炉の健全性評価の研究 (担当者名) 加治芳行

・メゾスコピック材料特性モデルを考慮できる大規模並列粘弾性解析アルゴリズムを開発した。

(3) セラミックス構造物設計のための超大規模構造解析 (総括担当者名) 金山寛

セラミックス構造物設計のための超大規模構造解析を目的とした、弾性応力解析プログラム、熱伝導解析プログラム、非弾性構成モデリングシステムを開発した。弾性応力解析プログラム、熱伝導解析プログラムは超大規模構造解析を目的としているため、階層型領域分割法による並列環境下での動的負荷分散を行なうことを前提に設計された。一方、幅広い材料特に非弾性材料の構造解析を可能にするため、非弾性構成モデリングのツールを開発した。

(a)超大規模構造解析の研究 (担当者名) 奥田洋司、塩谷隆二

・超大規模構造解析のための弾性応力解析プログラムを開発した。

・超大規模構造解析のための熱伝導解析プログラムを開発した。

(b)超大規模構造解析における構成方程式の研究 (担当者名) 古川知成

・非弾性構成モデリングシステムを開発した。

1.5 全体の総括と今後の課題

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などの熱効率のよい材料が従来の金属材料に代わって用いられるようになれば、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、このような背景のもとで非線形材料構造物の極めて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。

工業用材料のうちには弾性挙動のみ示すものから非線形弾性あるいは弾塑性挙動あるいは粘弾性挙動が現れるものまで様々である。もっと広く、木材なども一般には非線形弾性挙動が強い。構造解析については、従来は主として線形挙動を示し弾性解析で十分間に合う金属材料において解析が進められてきており、セラミックスなどのように物性特性が変動しかつ不均一で非線形弾性あるいは粘弾性挙動を示す材料については技術的に確立しているとはいいがたい。本研究開発でも従来と同じ有限要素法によるマクロな評価を行うが、材料特性値や構成方程式はメゾスコピック解析として理論的な扱いと現象論的な扱いの両方を用いて非線形材料構造物の評価法を確立することを目指した。

有限要素法による構造解析は設計レベルで行われているのは高々10万自由度程度であるが、研究では100万～1億自由度の問題が解かれつつある。本研究開発では、代表研究者らの過去の研究成果に基づき、複雑な構造物の100万自由度規模以上の問題を扱うことを目標とした。本ソルバーは、並列化の手法として階層型の領域分割法を用いて大規模問題の解析に対応している。階層型の領域分割法は、分散メモリ型の並列処理に基づいた領域分割法と動的負荷分散による大規模有限要素法構造解析の手法である。解析対象領域全体をあらかじめいくつかの部分領域に分割しておき、各部分領域における計算を各CPUに割振ることで並列化を行なうのが領域分割法と呼ばれる手法である。本ソルバーではその領域分割をさらに階層的に行なうことで、動的な負荷分散を図っている。さらに本研究開発では、階層型領域分割法アルゴリズムの再検討により、大規模有限要素解析のための新しいより高速なソルバアルゴリズムの開発に成功した。

本研究開発においてはセラミックスに代表される、材料特性が一定均一でなく気孔率などに依存する粘弾性構造物を扱うソフトウェアの開発を目指した。材料特性の理論的扱いとしては分子論的な評価に基づくことも可能であるが、設計や健全性評価においては計算規模の点から現実的ではない。本研究開発では機構論的アプローチとしてのメゾスコピック解析を用いる方法と、非弾性挙動が強い場合における現象論的なアプローチとしての、材料特性値や構成方程式をロバストな逆解析によって同定する方法の2つの手法を研究対象課題とした。メゾスコピック解析を用いる方法では、メゾスコピック理論に基づいた黒鉛のマクロ物性値決定手法を構築し、有限要素法粘弾性ソルバに組み込んだ。現象論的なアプローチでは、逆解析(逆問題的)アプローチに基づいた汎用非弾性材料モデリングシステムを開発した。本汎用非弾性材料モデリングシステムは対象材料の非弾性構成式、特に統一型構成式の材料定数を、実験データをもとに自動的に同定する。

また、構造物の複雑化に伴って構造解析の高精度化・大規模化への要求も大きい。現在、設計現場で使われている構造解析ソフトウェアが扱える解析規模は10万自由度程度であるが、複雑形状、特に応力集中部の詳細な評価にはさらに大規模な解析が強く望まれる。コンピュータハードウェアの急速な進歩とあいまって、近年、構造解析システムの並列化に関する研究が盛んに行われているが、実用化までにはいたっていない。本研究開発ではこれまでの研究成果に基づき、粘弾性構造物に対する100万自由度を超えるきわめて大規模な構造解析システムの開発を行なった。

物性特性が一定均一でない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。セラミックス構造物のメゾスコピック解析においては気孔が空間的に分布することと、気孔起因型のき裂進展があるために確率論的な扱いをすることが求められる。また、外的要因の不確実性の影響などを評価する上でも確率論的評価は必要である。本研究開発ではモンテカルロ法に基づいて、材料物性が均一でない非線形構造物の確率論的評価手法・ソフトウェアの開発を行った。

モンテカルロ法による確率論的評価においては、大規模な有限要素法構造解析をパラメトリックに行う必要がある。これには最新のコンピュータハードウェアを用いても、単一機での実行は現実的でない。たとえば1ケースの100万自由度弾塑性解析に6時間要するとして、モンテカルロ法で有意な解を得るための500ケースの解析には計算上4ヵ月を要する。これを4機関の超並列機をネットワークで接続して行えば計算上は1ヵ月程度で行うことができる。そこで、本研究ではネットワークを介して複数の機関にアクセスすることにより、モンテカルロ法をネットワーク上で実行するシステムを開発した。

本研究開発の実証解析として、メゾスコピック理論に基づいた黒鉛のマクロ物性値決定手法を組み込んだ有限要素法粘弾性ソルバと、モンテカルロ法をネットワーク上で実行するシステムにより、原子炉の実用黒鉛減速材の健全性評価を行なった。ネットワークの整備およびソフトウェアの機能向上により、評価対象モデル自由度およびモンテカルロ法試行回数双方共に、さらなる計算規模の向上を目指すこと、また、本研究で開発した汎用非弾性材料モデリングシステムをメゾスコピック解析に用いる材料特性パラメータの同定に適用し、非線形構造物解析に反映させ、確率論的構造物健全性評価の評価可能対象をメゾスコピック解析からも特定できない材料特性パラメータが未知の材料にまで広げることが今後の課題である。

1.6 研究開発実施体制

代表研究者氏名 秋 葉 博
 所属・役職 株式会社アライドエンジニアリング 社長

(1)研究開発題目1セラミックス構造物設計のための超大規模確率計算

A. 参加研究者氏名、所属、役職、研究開発項目(事業団が雇用・派遣した研究者等を含む)

氏名	所属	役職	研究開発項目
片井 義和	(株)アライドエンジニアリング 技術開発部	部長	システム設計・開発
鈴木 正文	(株)アライドエンジニアリング 研究開発室	主任研究員	確率論的構造健全性評価の研究
花本 雄一	(株)アライドエンジニアリング 研究開発室		システム設計・開発
久保田 修二	(株)アライドエンジニアリング 研究開発室		システム設計・開発

浜水 栄太	(株)アライドエンジニアリング 研究開発室		システム設計・開発
-------	--------------------------	--	-----------

B. 研究協力者名氏名、所属、役職、研究開発項目

無し

C. 招聘研究協力者氏名、所属、役職、招聘の目的、滞在先、滞在期間

無し

(2)研究開発題目2 セラミックス構造物設計のためのメゾスコピック解析

A. 参加研究者氏名、所属、役職、研究開発項目（事業団が雇用・派遣した研究者等を含む）

無し

B. 研究協力者名氏名、所属、役職、研究開発項目

氏名	所属	役職	研究開発項目
荒井 長利	日本原子力研究所 企画室・研究評価推進室	課長	破壊強度理論の研究
加治 芳行	日本原子力研究所 高温照射室		高温ガス炉の健全性評価の研究

C. 招聘研究協力者氏名、所属、役職、招聘の目的、滞在先、滞在期間

無し

(3)研究開発題目3 セラミックス構造物設計のための超大規模構造解析

A. 参加研究者氏名、所属、役職、研究開発項目（事業団が雇用・派遣した研究者等を含む）

氏名	所属	役職	研究開発項目
塩谷隆二	九州大学工学部・機械工学科	助教授	超大規模構造解析の研究
金山寛	九州大学工学部・機械工学科	教授	超大規模構造解析の研究

B. 研究協力者名氏名、所属、役職、研究開発項目

氏名	所属	役職	研究開発項目
奥田洋司	東京大学大学院工学系研究科	助教授	セラミックス構造物設計のための超大規模構造解析
古川知成	シドニー大学工学部機械工学科		超大規模構造解析における構成方程式の研究

- C. 招聘研究協力者氏名、所属、役職、招聘の目的、滞在先、滞在期間
無し

1.7 本事業により得られた研究成果

(1) 外部発表等

別添 1 参照。

(2) 成果プログラム等

1. 粘弾性有限要素法コード

- ・ 機能概要 階層型領域分割法による並列環境下での動的負荷分散を行い、中性子照射下における構造材料の時間依存した構造力学解析を行う。4面体1次、2次、6面体1次、2次要素に対応している。並列ライブラリとしてMPIを使用している。
- ・ 使用言語 C
- ・ モジュールサイズ 431KB

2. ポスト処理破壊確率計算コード

- ・ 機能概要 有限要素法ポスト処理として、有限要素法応力解析結果から最弱リンク仮説とWeibull理論に基づいて解析対象の破壊確率を計算する。有限要素法のメッシュデータ、応力分布のほか、解析対象のき裂分布を特徴づける形状パラメータ、スケール因子を入力データとし、破壊確率を出力する。
- ・ 使用言語 C++
- ・ モジュールサイズ 100KB

3. モンテカルロ実行サーバプログラム

- ・ 機能概要 WindowsNT上のクライアントGUIと通信を行うサーバプログラム。クライアントから送られてきた要求データに基づいて、ネットワークを用いたモンテカルロ計算の実行制御を行い、計算の結果をクライアントに送る。Linux kernel 2.0 2.2に対応。
- ・ 使用言語 C++
- ・ モジュールサイズ 80KB

4. 接続ホスト状況確認サーバプログラム

- ・ 機能概要 WindowsNT上のクライアントGUIと通信を行うサーバプログラム。クライアントから送られてきた接続ホスト状況確認用のコマンドデータを接続ホストへ送り、実行結果をクライアントへ送る。Linux kernel 2.0 2.2に対応。
- ・ 使用言語 C++
- ・ モジュールサイズ 14KB

5. モンテカルロ実行GUI

- ・ 機能概要 WindowsNT上でネットワークを用いたモンテカルロ計算の制御を行うクライ

アント GUI。確率変数、乱数、実行クラスタの設定、実行クラスタのホストの状況表示、モンテカルロ計算の実行、停止などを、GUI 上で行う事ができる。

- ・ 使用言語 C++
- ・ モジュールサイズ 613KB

6. 固体中熱伝導解析のための有限要素法ソルバ

- ・ 機能概要 階層型領域分割法による並列環境下での動的負荷分散を行い、固体中の熱伝導解析を行う。定常、非定常の解析が可能であり、4面体2次要素に対応している。プラットフォームは Unix, Linux に対応している。並列ライブラリとして MPI を使用している。
- ・ 使用言語 C
- ・ モジュールサイズ 166KB

7. 非弾性構成モデリングシステム

- ・ 機能概要 非弾性構成モデルの多様なモデリングを支援するツールである。塑性および粘塑性モデルを含む広範囲の構成式のモデリング、単軸材料試験下の構成モデルの単調（引張りあるいは圧縮）および周期的振舞いのシミュレーション、単軸材料試験実験データからの構成モデルの任意材料パラメータの同定を行なう。
- ・ 使用言語 C
- ・ モジュールサイズ

(3) 特許出願記録

出願日	発明の名称	発表者(寄与率)	出願人(持分)	整理番号
2001/5/14	並列有限要素法 計算システム	秋葉 博 (20) 大山 知信 (40) 鈴木 正文 (40)	アライドエンジニアリン グ (50) 事業団 (50)	

(4) 新聞記事、雑誌記事、テレビ報道等

無し

(5) 受賞等

無し

(6) ワークショップ等(主催分)

無し

別添 1

(a)原著論文

発表年	論文タイトル	掲載雑誌名 巻・号・ページ	著者名	整理番号
2000/9/5	Development of An Efficient Parallel FEM Analysis Program for Large Structural Problems Over Several Millions of DOF.	SNA2000, Se_101.doc, Se_101.pdf, pp.1-10	秋葉博	12A-1論01
2001/8/13	Analysis of Stress Intensity Factor of Piping using Large-Scale Analysis code ADventureCluster	Transactions of 16th SMiRT	秋葉博	13A-1論01
投稿中		日本機械学会誌	鈴木正文 大山知信 秋葉博	13A-1 論02

(b)口頭・ポスター発表

発表年月日 開催場所	発表タイトル	学会等の名称 (予稿集名、掲載ページ)	発表者	整理番号
1999/7/21	メソ/マクロ連成大規模並列粘弾性解析プログラムの開発	日本機械学会 1999 年度年次大会講演論文集 (II), pp.15	加治芳行	11A-1 発 01
1999/11/20	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	日本機械学会第 12 回計算力学講演会論文集, 99-5, pp.759-760	大山知信	11A-1 発 02