

超並列計算機を用いた進化的アルゴリズムによる
詳細非弾性構成方程式の材料定数自動同定

1997年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to:Technology
Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)1997

超並列計算機を用いた進化的アルゴリズムによる 詳細非弾性構成方程式の材料定数自動同定

川崎 信史*, Sunil Felix**, 笠原 直人*,
古川 知成***, 吉村 忍***, 矢川 元基***

要 旨

これまで高温ナトリウム機器・配管等の設計においては、正確な応力-ひずみ挙動の評価を行うよりも、安全側に挙動を包絡する簡易な手法を採用してきた。この結果、条件によっては非常に大きな安全裕度を与えることになり、コスト高の要因となっていた。高速炉を実用化していく上では、構造物の各部に発生する応力-ひずみ関係を正確に算定できる非弾性解析手法が必要となる。

一方、非弾性解析において材料の挙動を忠実に表現するための構成方程式として、多くの状態記述を行う詳細な式の適用が有力である。しかし、こうした式は、その材料定数の決定過程が複雑で、試行錯誤による膨大な作業が必要であった。簡易なモデルの持つ解析上の利点もあるが、この材料定数決定の難しさも詳細構成方程式の適用を阻む要因となっていた。

本研究では、目的関数の値のみによって最適解を探索できる、ロバスタな探索手法である進化的アルゴリズム(EA)を使用することによって、詳細非弾性方程式の一つであるChabocheモデルの有する23個の材料定数を同定する。以下に本報の主な結果をまとめる。

- (1) 詳細な非弾性構成方程式の材料定数を決定するという多大な負荷のかかる計算を、進化的アルゴリズムを実装したワークステーション(SUN Sparc Station10)と非弾性解析を行う超並列計算機(CRAY-T3D)をネットワークで結ぶことにより高速並列実行するシステムを開発した。
- (2) 進化的アルゴリズムを用いることにより、詳細な非弾性構成方程式の材料定数を自動的に同定できることを確認した。

本報告書は、東京大学工学部との共同研究の成果である。

契約番号: 084F040

事業団担当部課室及び担当者: 基盤技術開発部 構造・材料技術開発室 笠原 直人

* 大洗工学センター 基盤技術開発部 構造・材料技術開発室

** 大洗工学センター 基盤技術開発部 構造・材料技術開発室 国際特別研究員
在籍平成7年4月~平成9年3月

現 CEA Saclay Commissariat a l'Energie Atomique Direction des Reacteurs Nucleaires

*** 東京大学工学部

**Automated identification of material constants in complex constitutive equations
by an Evolutionary Algorithm and massively parallel processors**

Nobuchika Kawasaki*, Sunil Felix**, Naoto Kasahara*,
Tomonari Furukawa***, Shinobu Yoshimura***, Genki Yagawa***

ABSTRACT

In the designs of pressure vessels and piping, the simple evaluations of the behaviors with the margin factors have been adopted further than evaluating the precise stress-strain behavior. As this result, an excessive margin of safety is given, and it raises the construction cost. Therefore inelastic analysis which can correctly estimate the stress-strain relations of the structures is required to the commercial fast breeder reactors.

Meanwhile, it is leading to apply the detailed equations with the many internal variables for the description of the material behaviors. However, such equations have complicated decision processes of the material constants, and enormous works by the trial and error are necessary. Even if there are advantages of simple models, it is one of the reasons that prevent the application of complex inelastic equations.

In this study, 23 material constants in the Chaboche model, which is one of the detailed inelastic constitutive equations are identified by using Evolutionary Algorithm (EA). The algorithm is the robust search technique only by value of objective function.

Results of this study are summarized as followings.

- (1) Identification of material constants in the detailed inelastic constitutive equations requires considerable computations load on the computer. To overcome this difficulty, authors developed network system of EWS(SUN Sparc Station 10) for Evolutionary Algorithms and massive parallel processors(CRAY-T3D) for fast parallel computations.
- (2) By using the Evolutionary Algorithms, it was confirmed that the material constants used in the detailed inelastic constitutive equations can be automatically identified.

Work performed with university of TOKYO

Construct No.084F040

PNC Liaison : Structure and Material Research Section Kasahara Naoto

* Structure and Material Research Section, OEC

** Structure and Material Research Section, OEC,

International fellow, Tenure, from H7.April to H9.March

Present at, Commissariat a l'Energie Atomique Direction des Reacteurs Nucleaires,Saclay, CEA

*** School of Engineering, University of TOKYO

目 次

1. 緒言	1
2. 粘塑性構成方程式	3
3. 進化的アルゴリズム	6
4. 超並列処理システムおよびリモートコントロールマシンへの実装	9
5. 目的関数と最適解	11
6. 並列化による効果	15
7. 考察	16
8. 結言	17
謝辞	18
参考文献	19

List of figures and tables

- Fig.1 An algorithm of EA
- Fig.2 A chart of PVM system
- Fig.3 Stress-strain curve about test 1 at 600 cycle
- Fig.4 Stress-strain curve about test 2 at 80 cycle
- Fig.5 Stress-strain curve about test 3 at 75 cycle
- Fig.6 Stress-strain curve about test 4 at 140 cycle

- Table 1 A condition of PVM
- Table 2 Experimental condition
- Table 3 The constants obtained by EA

1. 緒言

これまで高温ナトリウム機器・配管等の設計においては、正確な非弾性挙動の評価を行うよりも、安全側に挙動を包絡する簡易な手法を採用してきた。この結果、条件によっては非常に大きな安全裕度を与えることになり、コスト高の要因となっていた。高速炉を実用化していく上では、構造物の各部に発生する応力-ひずみ関係を正確に算定できる解析手法が必要となる。

非弾性挙動を予測する手段には、高速原型炉の高温構造設計方針で取り扱われているような弾性解析結果から非弾性挙動を予測する方法、簡易的な非弾性解析の結果から実挙動を予測する方法、多数提案されている詳細非弾性解析による方法と様々なアプローチが考えられる。本研究では、解析手法自体の検討は他の研究^{1) 2) 3) 4) 12)}に譲り、詳細非弾性解析を行う際、必要となる材料定数の同定方法に目的を置く。

材料挙動の忠実な表現を目的として、材料の繰り返し非線形硬化特性、塑性とクリープの相互作用等、材料の様々な特性^{5) 6) 7)}の表現に対する試みがこれまでに数多くなされてきた。その結果として構成方程式は多数の材料定数を含んだ形式となり、この材料定数を的確に決定することが、構成方程式を有効に使用する上で必要不可欠な条件となっている。従来、材料定数同定問題^{8) 9)}は、構成方程式の詳細な理解を前提とする構成方程式に固有の問題であり、一般的に適用できる普遍的な方法は提案されていなかった。これらの方法では、試験結果と、内部状態変数をパラメトリックに変化させた構成方程式を比較することにより、材料定数を間接的に一つ一つ決定していく。たとえ設計者が定常サイクルの応力-ひずみ関係の使用を意図し、応力-ひずみ関係に対して最適化された材料定数の取得を試みても、これらの方法では、定式化自体の誤差を含んだ構成方程式に対して最適化された材料定数に基づく応力-ひずみ関係を間接的に取得することしかできない。設計者が使用する応力-ひずみ関係等に対し直接最適化を計ることができ、かつ普遍的な方法は、古川らによって進化的アルゴリズム(EA)¹⁰⁾による同定手順¹¹⁾が示されるまで存在しなかった。

本研究では、目的関数の値のみによって最適解を探索できるロバストな探索手法であるEAを使用することによって、詳細非弾性方程式の一つであるChabocheの統一粘塑性モデル¹⁾に現れる23個の材料定数を同定する。同定過程では、試験温度 550℃でひずみ範囲、ひずみ速度が異なる3種類の繰り返し応力-ひずみデータを使用した。

確率論的な探索手法でもあるEAにより材料定数の最適値を求めるには、数千回にも及ぶ目的関数の計算が必要である。Sun Sparc Station 10(SS10)による試算では1世代の計算(50回の目的関数の計算)に、10日程度の時間を必要とした。実用的な精度の解を得るためには、100世代(50回 X 100世代)以上の計算回数を必要とするため、並列化に有利であるというEAの特徴を生かし、超並列計算機(CRAY-T3D)の利用を計画した。ネットワーク上のワークステーション(SS10)からParallel Virtual Machine(PVM)の技術を用いてT3Dを制御することで、計算負荷の高い目的関数の計算をT3DにEA自体のアルゴリズムの計算をSS10に行わせることが可能となり、計算負荷が小さいEA自体はワークステーション上で、計算負荷の重い目

的関数は並列計算機上で計算でき、なおかつ使用者に超並列計算機が存在をまったく意識させないシステムを構築した。本システム上で、36 個のプロセッシング・エレメント(PE)を使用し、100 世代、約 40 時間という現実的な時間で、材料定数の同定に成功した。

2. 粘塑性構成方程式

材料の移動硬化(kinematic hardening)と等方硬化(isotropic hardening)によって材料挙動の記述を試みた非弾性構成方程式はこれまで数多く提案されてきた。本研究では、降伏局面(yield surface)の概念を粘塑性ポテンシャル(viscoplastic potential)の概念に拡張した、Chabocheの粘塑性構成方程式を例に用いて、そこに現れる23種類の材料定数を同定した。Chabocheの統一粘塑性モデル(The Chaboche Unified Viscoplastic Model, CUVM)は、移動硬化則はマイクロストラクチャの観点から背応力 X(Back Stress)を短長、2種類の要素に分けてモデル化しており¹⁾¹³⁾¹⁴⁾、さらにArmstrongとFrederickの提案した非線形移動則¹⁵⁾を用いて動的回復項を考慮している。等方硬化則については、弾性領域の拡大を意味する抗応力 R(drag stress)をひずみ範囲の関数である Q に漸近させることで記述している。以下に構成方程式の詳細を示す。

Chabocheの統一粘塑性モデル(The Chaboche Unified Viscoplastic Model, CUVM)

粘塑性流れ則

$$\dot{\Omega} = \frac{K}{\alpha(n+1)} \exp\left(\alpha \langle \sigma_v / K \rangle^{n+1}\right) \quad (1)$$

ただし、

$$\sigma_v = J(\sigma - X) - \alpha_R R - k$$

σ : 応力テンソル

X : 降伏面の原点移動量 (移動硬化)

R : 降伏面の拡大量 (等方硬化)

k : 初期降伏面の大きさ

$$J(\sigma - X) = \left(\frac{3}{2} (\sigma' - X') : (\sigma' - X') \right)^{1/2} \quad (\text{Von-Mises のクライテリア})$$

σ', X' : σ, X の偏差テンソル

$$K(R) = K_0 + \alpha_K R$$

$$\langle u \rangle = uH(u) \quad H = \text{Heaviside 関数}$$

$\alpha, n, k, K_0, \alpha_R, \alpha_K$ 材料定数

硬化則

・移動硬化：

$$X = X_1 + X_2 \tag{2}$$

$$\dot{X}_1 = \frac{2}{3}c_1a_1\dot{\epsilon}_p - c_1\Phi(p)X_1\dot{p} - \beta_1|X_1|^{r_1-1}X_1$$

$$\dot{X}_2 = \frac{2}{3}c_2a_2\dot{\epsilon}_p - c_2\Phi(p)X_2\dot{p} - \beta_2|X_2|^{r_2-1}X_2$$

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{\partial\Omega}{\partial\sigma} = \frac{3}{2}\dot{p} \frac{\sigma' - X'}{J(\sigma - X)} \quad \text{粘塑性ひずみ速度}$$

$$\dot{p} = \left\langle \frac{\sigma_v}{K} \right\rangle^n$$

$$\Phi(p) = \Phi_S + (1 - \Phi_S)e^{-bp}$$

$a_1, a_2, c_1, c_2, \beta_1, \beta_2, r_1, r_2, \Phi_S$ 材料定数

・等方硬化：

$$\dot{R} = b(Q - R)\dot{p} + \gamma|Q_r - R|^{m-1}(Q_r - R) \tag{3}$$

非硬化領域: $F = I(\epsilon_p - \xi) - q = \left[\frac{2}{3}(\epsilon_p - \xi) : (\epsilon_p - \xi) \right]^{\frac{1}{2}} - q \leq 0$

$$\dot{q} = \eta H(F) \langle n : n^* \rangle \dot{p}$$

$$\dot{\xi} = \sqrt{\frac{2}{3}}(1 - \eta) H(F) \langle n : n^* \rangle n^* \dot{p}$$

$$n = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sigma' - X'}{J(\sigma - X)}$$

$$n^* = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\epsilon_p - \xi}{I(\epsilon_p - \xi)}$$

$$\dot{Q} = 2\mu(Q_{\max} - Q)\dot{q}$$

$$Q(0) = Q_0 \quad \text{初期条件}$$

$$Q_r = Q - Q_r^* \left(1 - \left(\frac{Q_{\max} - Q}{Q_{\max}} \right)^2 \right)$$

$b, \gamma, m, \eta, \mu, Q_0, Q_{\max}, Q_r^*$ 材料定数

このモデルに必要な 23 個の材料定数は以下のようになる。

$$\begin{aligned} &\alpha, n, k, K_0, \alpha_K, \alpha_R, c_1, a_1, \Phi_S, \\ &c_2, a_2, b, \beta_1, \beta_2, r_1, r_2, \gamma, m, \\ &\eta, \mu, Q_0, Q_{\max}, Q_r^* \end{aligned}$$

3. 進化的アルゴリズム

構成方程式の材料定数同定方法に関しては、構成方程式の提案者を中心にいくつかの研究報告がある。それらは個々の方程式に定式化された材料定数を個別に同定する構成方程式固有の方法であり、各々の構成方程式に対する深い造詣と試行錯誤的な最適化が要求される方法である。

一方、計算機の処理能力は近年めざましく向上し、全材料定数を同時に自動決定しようとする試みも成されてきた。非弾性構成方程式の材料定数同定は、非線形性が強く局所解の多い巨大かつ複雑な解の探索空間から大域的最適解を探索する問題と考えられる。計算機を用いた最適化手法としては、関数の勾配情報を用い目的関数に従って最適化していく勾配法や Newton-Raphson 法といった間接探索法、ダイナミックプログラミング、遺伝的アルゴリズム(GA)^{16) 17)}、進化的アルゴリズム(EA)¹⁰⁾といった順解析結果による直接探索法が挙げられる。この中で非弾性構成方程式は、非線形性が強く個々の構成方程式が相互に作用する複雑な体系のため、間接探索法の適用は困難であり、ダイナミックプログラミングの適用は膨大なメモリ空間を必要とする非現実的なものである。複数の探索開始点から目的関数の値のみを用いて解空間を探索できる GA はこのような問題に対し非常に有効な方法である。さらに実数ベクトル化された個体を探索個体として持ち、連続空間探索に適する EA は GA に比べ非弾性構成方程式の材料定数同定に最適な手法である。Fig.1 に EA のアルゴリズムを示すとともに、以下追ってその内容を述べる。

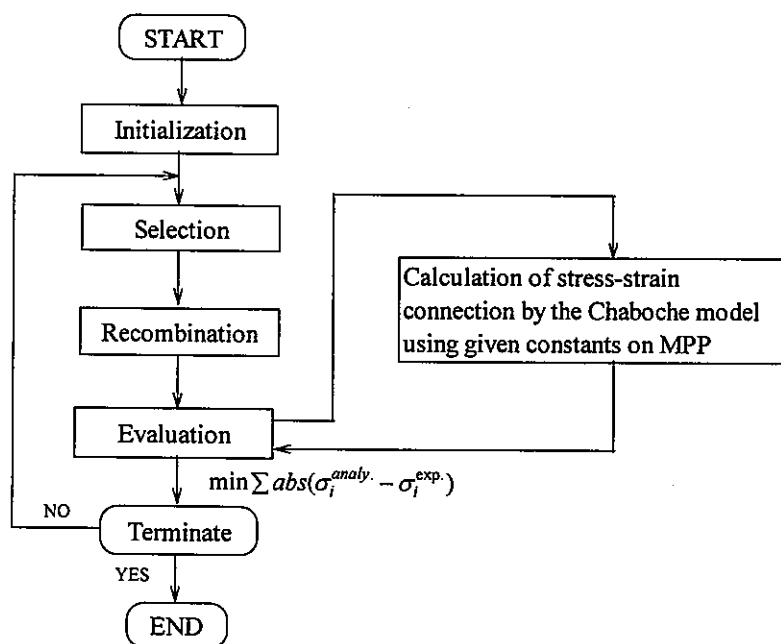


Fig.1 An algorithm of EA

EA は自然界において生物の進化していく過程を模擬して考え出されたものであり、個体群 (population of individuals) から相互の組替え (recombination) により、次世代 (next generation) の個体群を生成し、目的関数を最小化する個体群が生き残っていく (evaluation) プロセスを繰り返すアルゴリズムである。個体群を探索点と扱えば、一種の多点探索手法と考えられる。

(i) 初期化 (Initialization)

初めに、探索の開始点となる初期個体群を生成する (式 4) 。初期変数として指定した個体を与えることもできるが、解空間を大域的に効率良く探索するためにランダムな初期個体群を生成し局所解に陥らないようにする。GA では遺伝子の離散的表現に基づき 2 進数ストリングで各個体をモデル化しているが、EA においては連続空間の探索に適した実数ベクトルで個体のモデル化を行う。

$$P^t = \{x_1^t, \dots, x_\lambda^t\} \in X^\lambda, \quad (t=0) \quad (4)$$

ここで、 λ は個体数を、 x^t は式(2)で示される同定する材料定数をベクトル表現しており、 t が世代数を意味する。:

$$x^t = (a, n, k^*, K_0, a_K, a_R, a_1, c_1, a_2, c_2, \phi_\alpha, b, \beta_1, \beta_2, r_1, r_2, \gamma, m, \eta, \mu, Q_0, Q_{\max}, Q_r^*) \quad (5)$$

(ii) 組替え (recombination)

EA では、個体を実数ベクトル表現しているため、進化に関する演算も連続空間探索に適したマクロ的な定式化となる。つまり、GA では交叉 (crossover) と突然変異 (mutation) で組替えを行うのに対し、EA では線形補間と補間係数で新しい個体群を生成する。その過程は x_α^t, x_β^t を親個体、 $x_\alpha^{t+1}, x_\beta^{t+1}$ 新しく生成する子個体、 μ を正規分布に従う補間係数とした時、次のように記述できる。

$$\begin{cases} x_\alpha^{t+1} = r''(x_\alpha^t, x_\beta^t) = (1-\mu) \cdot x_\alpha^t + \mu \cdot x_\beta^t \\ x_\beta^{t+1} = r''(x_\beta^t, x_\alpha^t) = \mu \cdot x_\alpha^t + (1-\mu) \cdot x_\beta^t \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $r''(X, Y)$ は X と Y の組替えを意味する。

(iii) 評価 (evaluation)

評価は x^t を入力とする目的関数 $f(x^t)$ を最小化するように行った。その際、構成方程式の非線形性が強い空間においても安定して大域探索を可能にする、子孫を適応度の純粋な割合ではなく適応度の順位に比例して残す手法であるランキング選択¹⁸⁾を用いている。目的関数の形式については 5 章目的関数と最適解で記述する。

なお、古川らの提案した EA のソフトウェアは汎用的 GAs ソフトウェアである Grefenstette ¹⁹⁾ の GENESIS Ver.5.0 (2400 行) を 200 行程度改良したものであり、GENESIS のほとんどすべての選択機能を利用可能である。

4. 超並列処理システムおよびリモートコントロールマシンへの実装

EA のアルゴリズムは、同一の目的関数を個体群の数だけ独立に呼び出す並列化に最適なアルゴリズムである。各試行における相違点は、目的関数に対する入力パラメータのみであり、収束回数等、細部が異なるだけである。つまり、ウェイトコントロールのような煩雑な設定なしで、並列化の寄与にあずかることができる。

本研究では、負荷が重く並列計算が可能な問題固有の目的関数モジュールを超並列計算機 (CRAY T-3D)に置き、負荷が軽く問題に依存しない EA 自体のアルゴリズムをワークステーション (SUN SPARC 10)上に置いた。その上で、ネットワークで両者を結び、Parallel Virtual Machine (PVM) ^{20) 21)}の技術を用い SS10 から T-3D を目的関数計算サーバーとして扱えるクライアントサーバーシステムを構築した。

PVM は、ネットワークに接続された異機種コンピュータ群を、仮想的な並列コンピュータとして利用することを可能にするソフトウェアシステムである。その技術を利用し T3-D の持つ 36 個の PE に対し材料定数パラメータ x^i を送信し、その評価結果 $f(x^i)$ をホストマシンで受け取る。システムの構成図を Fig.2 に使用した計算機を Table 1 に示す。EA の並列化への応用は、EA の評価モジュールを 300 行程度改良し行った。EA が元来保持していた適応関数の選択機能等の拡張機能は、そのまま保持している。

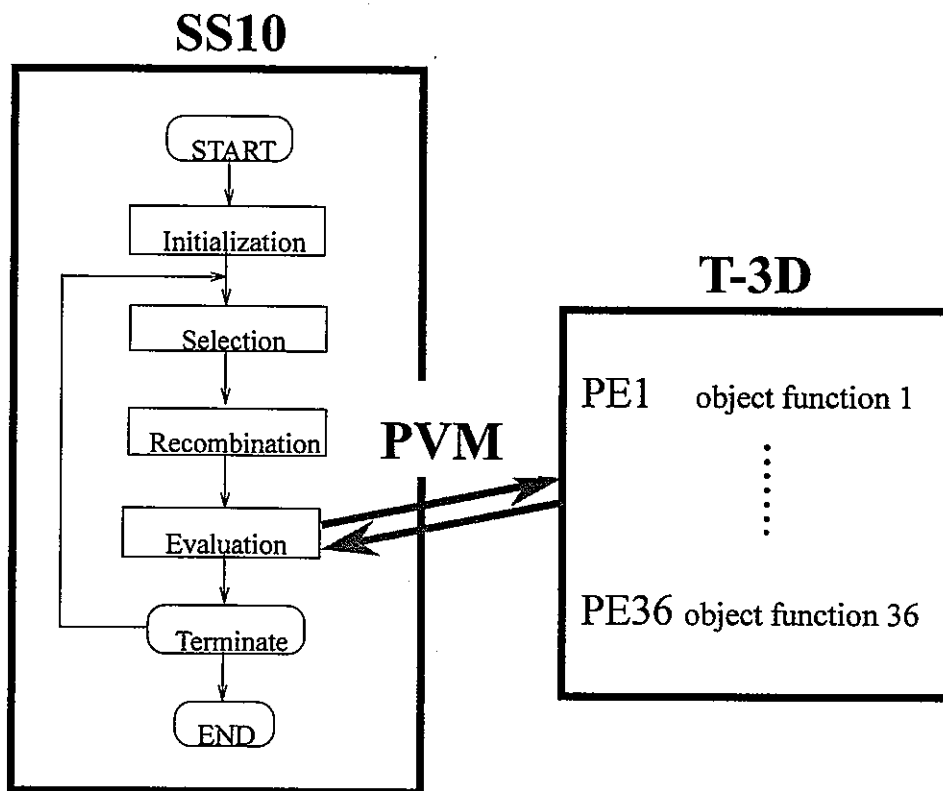


Fig.2 A chart of PVM system

Table 1 A condition of PVM

MACHINE	Sun SparcStation 10	CRAY T3D/128
OS	Sun OS 4.1.3-JL 1 sun4m	UNICOS-MAX 1.3.0.3
PVM VERSION	Ver.3.3.7	Ver.3.3.7(Cray Version 2.1.2)

5. 目的関数と最適解

Table2 に示す試験温度 550°C の単軸繰返し引張り圧縮試験の定常サイクルデータを用いて材料定数の同定を行った。

Table 2 Experimental condition

TEST NAME	MATERIAL	STRAIN RANGE (mm/mm)	STRAIN RATE (mm/mm・s)	SATURATED CYCLE
TEST No.1	SUS304	4.88E-3	1.00E-3	600
TEST No.2	SUS304	1.01E-2	1.00E-3	80
TEST No.3	SUS304	1.54E-2	1.00E-6	75
TEST No.4	SUS304	6.64E-3	1.00E-3	140

目的関数は、次式のように定常サイクルにおいて、試験より得られる応力値 $\sigma_i^{\text{exp.}}$ と非弾性解析により計算された応力値 $\sigma_i^{\text{calc.}}$ の偏差に対し、応力範囲が再現できるよう重み w_i を付けたものを使用した。

$$f_j(x') = \sum_{i=1}^m w_i (\sigma_i^{\text{exp.}}(\varepsilon_i) - \sigma_i^{\text{calc.}}(\varepsilon_i, x'))^2 \quad (6)$$

m : a number of evaluation points in the cycle

j : the number described test name

探索開始世代において、ランダムに与えられた材料定数は 3 章で記述された EA のアルゴリズムに従って、式(6)の目的関数 f_1, f_2, f_3 を同時に最小化するように進化する。目的関数を最小化した材料定数を Table 3 に、解析結果と試験結果の比較を Fig.3, Fig.4, Fig.5 に示す。また、同定に用いた条件以外の一般的な場合に対する適用性を検討するために、同定した材料定数を用いてひずみ範囲 6.64E-3 mm/mm、ひずみ速度 1.00E-3 mm/mm・s、定常サイクル 140 という TEST No.4 に対する比較を行った (Fig.6)。

Table 3 The constants obtained by EA

<i>the constants name</i>	<i>symbol</i>	<i>value</i>
<i>viscoplasticity threshold exponent</i>	<i>n</i>	<i>1.4162E+01</i>
<i>initial value for elastic limit</i>	<i>k</i>	<i>6.8554E+01</i>
<i>initial factor for the threshold normalization</i>	<i>K₀</i>	<i>1.6848E+02</i>
<i>K isotropic evolution coefficient</i>	<i>α_K</i>	<i>0.0000E+00</i>
<i>threshold isotropic evolution coefficient</i>	<i>α_R</i>	<i>0.0000E+00</i>
<i>viscosity coefficient</i>	<i>α</i>	<i>1.0704E+07</i>
<i>plastic strain coefficient</i>	<i>a₁</i>	<i>1.1141E+02</i>
<i>reference term coefficient</i>	<i>c₁</i>	<i>5.8655E+02</i>
<i>normalization factor for restoration</i>	<i>β₁</i>	<i>1.7528E+03</i>
<i>restoration term exponent</i>	<i>r₁</i>	<i>4.5925E+00</i>
<i>plastic strain coefficient</i>	<i>a₂</i>	<i>1.4065E+02</i>
<i>reference term coefficient</i>	<i>c₂</i>	<i>5.2613E+01</i>
<i>normalization factor for restoration</i>	<i>β₂</i>	<i>2.9031E+01</i>
<i>restoration term exponent</i>	<i>r₂</i>	<i>8.8322E+00</i>
<i>reference term multiplying coefficient</i>	<i>Φ_s</i>	<i>1</i>
<i>isotropic stress hardening coefficient</i>	<i>b</i>	<i>9.5189E+00</i>
<i>restoration effect coefficient</i>	<i>γ</i>	<i>8.7465E-06</i>
<i>restoration term exponent</i>	<i>m</i>	<i>8.9365E+00</i>
<i>Q maximal value</i>	<i>Q_{max}</i>	<i>6.8600E+02</i>
<i>Q stabilized value</i>	<i>Q_r[*]</i>	<i>1.3082E+02</i>
<i>initialization of internal variable</i>	<i>Q₀</i>	<i>30</i>
<i>Q evolution law coefficient</i>	<i>μ</i>	<i>7.5083E+00</i>
<i>factor linking q with the plastic strain</i>	<i>η</i>	<i>6.8987E-02</i>

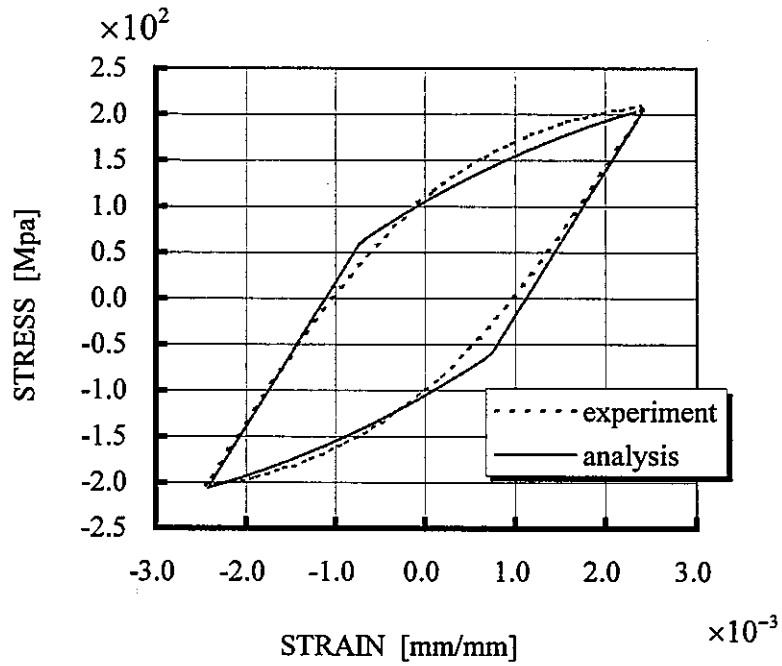


Fig.3 Stress-strain curve about test 1 at 600 cycle

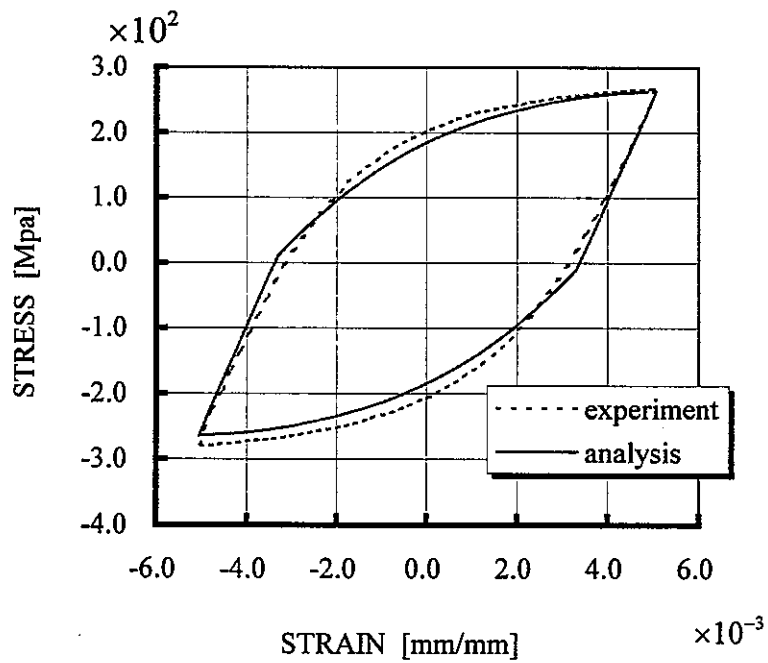


Fig.4 Stress-strain curve about test 2 at 80 cycle

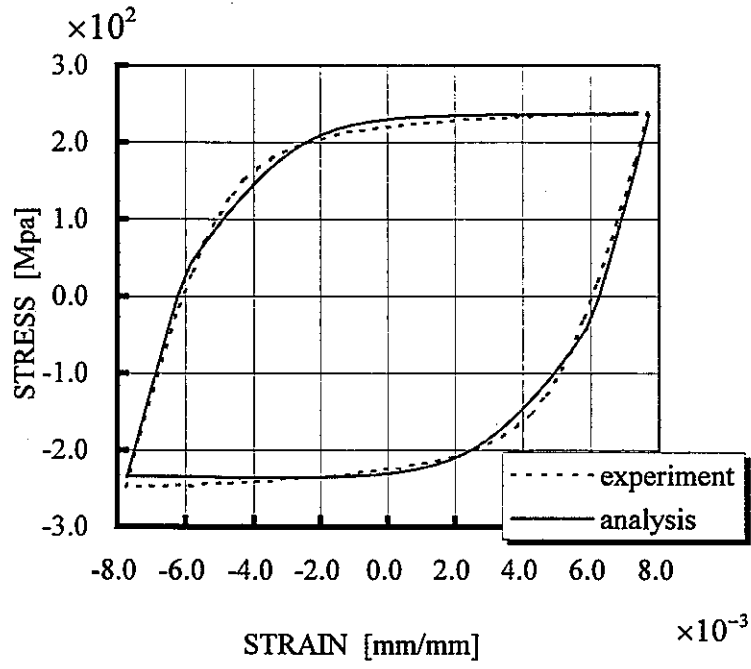


Fig.5 Stress-strain curve about test 3 at 75 cycle

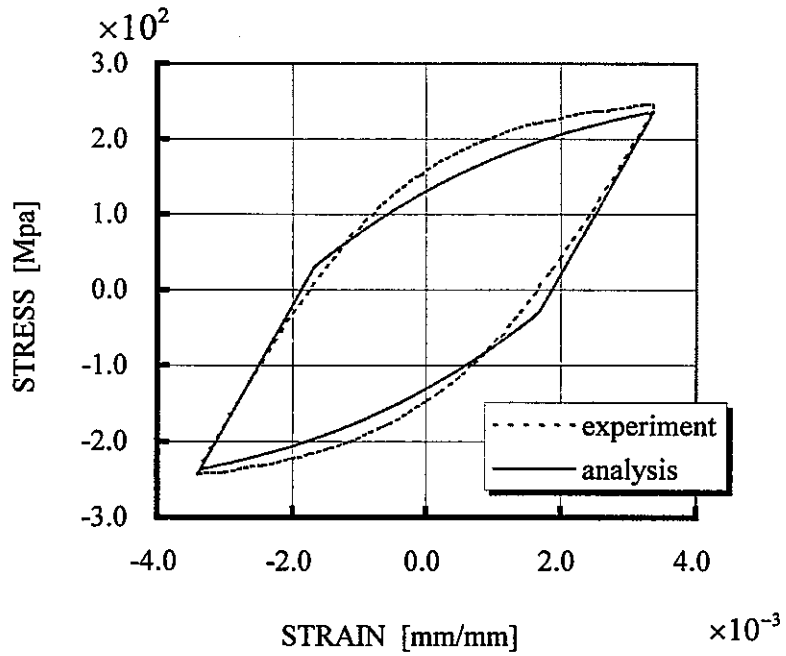


Fig.6 Stress-strain curve about test 4 at 140 cycle

6. 並列化による効果

確率論的な探索手法でもある EA において材料定数をの最適値を見つけるには、数千回にも及ぶ目的関数の計算が必要である。SS10 による試算では 1 世代の計算 (50 回の目的関数の計算) に、10 日程度の時間を必要とした。SS10 における、目的関数 1 回分の計算時間は 1CPU 当たり 4.8 hour/CPU/individual であり、T3-D においては、100 世代 (36PE) 約 40 時間であるので、1PE 当たり 0.4 hour/PE/individual となる。これは、PE 自体の能力比が 12 倍、並列化による加速が 36 倍、計 432 倍の向上が図れていることを意味する。また、材料定数同定のような目的関数の計算に対する負荷が重く、通信量が少ないケースでは、並列 PE 数と効率が純粋に比例して向上する。今回の同定では、アルゴリズムを同定するのに 1 世代 36 個体で十分であったため、36PE 使用した。目的関数の値を各世代ごとにプロットし、収束の度合いを示したものを Fig.7 に示す。なお、目的関数の値 $\sum_{j=1}^3 f_j(x')$ は、3 種類の重みのついた関数になっており、サイクル全体の応力偏差の関数を表現している。

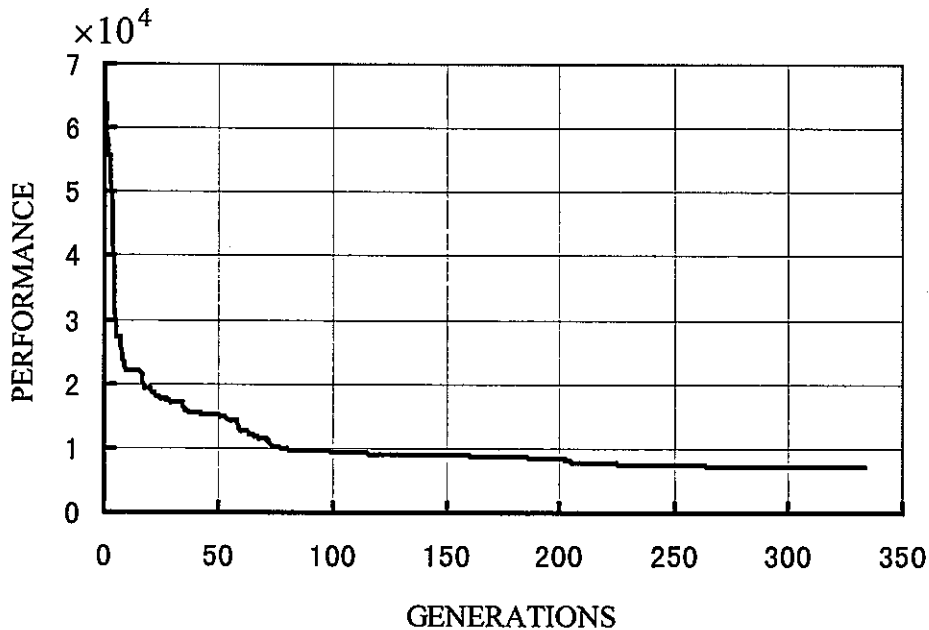


Fig.7 History of performance

7. 考察

本研究では、詳細非弾性構成方程式の材料定数を決定する一般的かつ自動的な方法を示した。構成方程式に Chaboche の粘塑性モデルを取り上げ、ひずみ範囲、ひずみ速度が異なる試験体における繰返し応力-ひずみ関係を記述する最適な材料定数を求めた。システムは目的関数の変化に容易に対応できるように、目的関数のモジュールを独立した計算サーバーとして分散させ構築した。

以下にその過程で得られた考察を列記する。

- 構成方程式の硬化過程、つまり非定常サイクルにおけるピーク応力履歴（式(2)及び(3)発展式で表現される。）の再現を目的とする時には、目的関数にピーク応力における解析と試験結果の偏差を数サイクル分導入することによって材料定数を決定できる。その場合は、 α_R 、 α_K の変化が予想される。
- 回復の及ぼす影響を調査する時には、応力保持時間をもったクリープ疲労試験を試験データに使用することで可能となる。ただし、Chaboche の粘塑性モデルは粘塑性流れ則のべき乗数が高いため急激に塑性ひずみを生じ、数値的不安定性をもつ、材料定数を個体として持ち広大な解空間を探索する時にはその点に注意が必要である。
- 温度の影響は、各温度に対する材料定数のテーブルを作成することで解決できる。

8. 結言

以下に本研究における成果を列挙する。

- (1) 進化的アルゴリズムを用いることにより、詳細非弾性構成方程式の材料定数を自動的に同定できることを確証した。
- (2) 詳細非弾性解析の材料定数を決定するという多大な負荷のかかる計算を、進化的アルゴリズムの特徴を生かし、超並列計算機(CRAY-T3D)に実装することで可能にした。その結果 SUN SS10 に対して 432 倍の効率比が得られた。
- (3) 超並列計算機(CRAY-T3D)を Parallel Virtual Machine(PVM)の技術を用いホストマシン(SS10)から制御することで、負荷の軽い EA のアルゴリズムそのものをホストマシンに、計算負荷が重く並列化可能な目的関数を T3-D に持つ、問題に依存しないロバストな分散システムを構築し、設計者の要求に根差したユーザーオリエンテッドな探索手法を提案した。

謝辞

本研究を実施するに当たり、計算機へのアルゴリズムの実装において、常陽産業株式会社の細貝広視氏には多大なご協力をして頂きました。また、技術協力部情報室の菅谷氏、日本クレイ株式会社総合技術センターの原口部長、袴田氏には CRAY T-3D に関する数多くのサポートをして頂きました。ここに、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) Chaboche, J.L. et al., A Unified Constitutive Model for Cyclic Viscoplasticity and Its Applications to Various Stainless Steels, Trans. ASME Vol.111, (1989) 424-430
- 2) 村上 澄男 他, '回復可能なクリープ硬化範囲を規定した多軸変動応力クリープ構成式' 機論 A48-428, (1982) 431-439
- 3) 大野 信忠 他, '非線形硬化材料の繰返し塑性構成式' 機論 A51-470, (1985) 2349-2358
- 4) 井上 達雄 他, '高温多軸応力下における SUS304 鋼の非弾性挙動に関する研究', 機論 A52-473, (1986) 49-66
- 5) 朝田 泰英 他, ' ', 機論 A62-601, (1996) 1979-1984
- 6) Chaboche, J.L. et al., On the Plastic and Viscoplastic Constitutive Equations – Part II: Application of Internal Variable Concepts to the 316 Stainless Steel, J. PVT Vol.105, (1983) 159-164
- 7) 岩田 耕司 他, 'FBR 用構造材料の非弾性挙動に関する実験的研究', 三菱重工技報 Vol.19 No.3, (1982) 249-255
- 8) Hishida, H. et al., Prediction of Life Time of the First Wall under Thermal Fatigue based on Viscoplastic Deformations, SmiRT 11 Trans. Vol.L, (1991) 289-294
- 9) Ramaswamy, V.G., A Constitutive Model for the Inelastic Multiaxial Cyclic Response of a Nickel Base Superalloy RENE'80, ph.D.. thesis, University of Cincinnati, 1985
- 10) 古川 知成 他, '連続探索空間のための遺伝的アルゴリズムとその非線形逆問題への応用', 機論 A61-586, (1995) 265-271
- 11) Furukawa, T., Parameter Identification of Inelastic Constitutive Equations Using an Evolutionary Algorithm, Proc.1995 ASME/JSME PVP Conf., (1995) 123-129
- 12) Asada, Y., Creep-Fatigue Evaluation Based on the Overstress, Trans. ASME, J. PVT, Vol.113, (1991) 187-194
- 13) Chaboche, J.L. et al., On the Plastic and Viscoplastic Constitutive Equations – Part I: Rules Developed With Internal Variable Concept, J.PVT Vol.105, (1983) 153-158
- 14) Chaboche, J.L. et al., Modelization of the Strain Memory Effect on the Cyclic Hardening of 316 Stainless Steel, SmiRT-5 Division L, (1979) 1-10
- 15) Armstrong, P.J. et al, A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect, C.E.G.B. Report RD/B/N 731, (1966)
- 16) Holland, J.H., Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of the Michigan Press, Ann Arbor, MI, (1975)
- 17) Goldberg, D., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley, (1989)
- 18) Baker, J.E., Adaptive Selection Methods for Genetic Algorithms, Proc. of the 1st Int.

- Conf. on Genetic Algorithms and Their Applications ,(1985)101-111
- 19) Grefenstette, J.J., GENESIS: A system for Using Genetic Search Procedures , Proc.of the 1984 Conf. on Intel. Sys. and Mech. , (1984)161-165
 - 20) Sunderam V.S. , PVM : A Framework for Parallel Distributed Computing , J.of Concurrency : Practice and Experience , 2(4),(1990)315-339
 - 21) Sunderam V.S. et al , PVM3 USER'S GUIDE AND REFERENCE MANUAL , the Oak Ridge National Laboratory , <http://www.netlib.org/>