様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成２１年　５月２２日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2007～2008
課題番号：19560096
研究課題名（和文）　時系列マルチスケール疲労き裂進展解析

研究課題名（英文）　Fatigue crack propagation analysis using the temporal multiscale analysis scheme

研究代表者
岡田　裕（OKADA HIROSHI）
鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：50281738

研究成果の概要：
エネルギー機器，航空機，船舶，橋梁等様々な構造の構造健全性評価において，破壊力学と有限要素法に基づくき裂進展解析は大変有用なツールである．き裂進展解析により，構造余寿命や構造の載荷能力を知ることができる．ところが，金属材料で構成される構造のき裂進展現象において，き裂の先端近傍で塑性変形が発生することが多い．そのため，き裂進展解析を精密に行おうとすると，一荷重サイクルを数増分ステップに分け，さらに，数千～数十万回にわたる繰返し荷重サイクルに対する弾塑性解析を行う必要が生じる．
このような解析は，計算コストの面から現実的には不可能である．そのため，現在のところ，疲労き裂進展解析のほとんどは材料を線形弾性体であると仮定して行われている．また，進展中のき裂を静止き裂と見なして弾塑性解析を行うこともあるが，ひずみ履歴を全く無視しており，精度が良いとはいえない．
時系列マルチスケール解析手法により，弾塑性疲労き裂進展解析を精度良く，かつ現実的な計算コストで可能にすることが本研究の目的である．
実施した研究項目は，(1) 既往研究の調査，(2) 時系列マルチスケール解析の定式化，(3) 時系列マルチスケール解析によるき裂進，(4) 一次元問題解析による定式化の検証，(5) 時系列マルチスケール手法のコンピュータプログラム実装と実証解析，である．以上より，時系列マルチスケール解析の定式化と実行に成功したといえる．

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2007 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総　計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：機械工学
科研費の分科・細目：機械材料・材料力学
キーワード：き裂進展解析

１．研究開始当初の背景

エネルギー機器，航空機，船舶，橋梁等，などのインフラストラクチャーは，我々の安全・安心のために無くてはならないものである．それらインフラストラクチャーの構造健全性評価とメンテナンスを適切に実施し，突然の事故や故障，破壊を防止することは大変重要である．

構造損傷の代表例は疲労き裂の発生と進展である．特に，疲労き裂進展は多くの場合で構造の余寿命を決定する重要な因子である．疲労き裂進展予測を有限要素法で行う際，多くの場合で線形弾性材料を仮定する．ところが，多くの疲労き裂問題でき裂先端近傍の応力集中によって塑性変形が発生し，き裂閉口挙動やき裂先端の応力特異性に影響を及ぼす．本来，き裂先端近傍の塑性変形は疲労き裂進展に大きな影響を及ぼすにもかかわらず無視されてきたといえる．

近年，均質化法に代表されるマルチスケール解析手法が大きな発展を遂げている．最近では，異なる空間長さの問題を連成して解く“空間マルチスケール解析”だけでなく，異なる“時間スケール”の問題を連成する時系列マルチスケール解析手法も提案されているが発展途上である．

繰返し荷重下における疲労き裂は，荷重サイクル毎にき裂が微小長さ進展するが，構造破壊に至るまでには数千～数百万繰返し荷重サイクルを要する．すなわち，一繰返し荷重サイクルあたりのき裂進展現象を”短い（ミクロ）時間”に関する現象，破壊に至るき裂の進展は”長い（マクロ）時間”に関する事象であると考えることができる．そのため，時系列マルチスケール解析手法により，一部のミクロ時間問題解析からマクロなき裂進展挙動の評価をすることができれば，非線形現象を伴うき裂進展解析を精密に実施することが可能になる．

以上のように本研究は，“安心・安全”な社会生活を支えるためのインフラストラクチャーを維持し続けるための工学解析手法の高度化に関する要求と，近年注目されてきたマルチスケール解析手法への期待を背景として提案されたものである．

２．研究の目的

弾塑性材料の変形はそのひずみ履歴に依存する．また，弾塑性材料中のき裂進展では，き裂進展後に発生する残留応力が，き裂先端の応力特異性に影響を与えることが知られている．そのため，弾塑性材料のき裂進展解析において，材料各点のひずみ履歴を精密に再現することが必要である．すなわち，塑性変形の発生する疲労き裂進展問題においては，全ての繰返し荷重とき裂進展ステップに対して，増分型の弾塑性有限要素法解析を実施する必要がある．

しかしながら，例えば，10 万繰返し荷重サイクル，そして各繰返し荷重サイクルに対して数～数十増分を要する増分型非線形有限要素法解析を実施することは，計算コストや誤差の蓄積という観点から困難である．そこで，時系列マルチスケール解析手法を導入し，一～十荷重サイクルという”短い（ミクロ）”時間スケールと数十～数十万荷重サイクルの結果発生する塑性ひずみの蓄積やき裂進展という”長い（マクロ）”時間スケールの問題に分けて解析することを考える．

本研究の目的は，（ア）繰返し負荷を受ける弾塑性材料からなる構造の時系列マルチスケール解析の定式化，（イ）時系列マルチスケール解析の節点解放法や節点移動法によるき裂進展解析への適切な適用手法の提案，（ウ）時系列マルチスケール手法における適切なき裂パラメータの計算手法の提案，（エ）時系列マルチスケール手法のコンピュータプログラム実装と実証解析の実行をすることにより，弾塑性材料の疲労き裂進展解析を実用的な計算コストと適切な解析精度のもとで実行可能にすることである．

３．研究の方法

以下の手順で研究を実施した．詳細については，研究成果とともに述べる．

(1) 既往研究の調査
(2) 時系列マルチスケール解析の定式化
(3) 時系列マルチスケール解析によるき裂進
(4) 一次元問題解析による定式化の検証
(5) 時系列マルチスケール手法のコンピュータプログラム実装と実証解析

４．研究成果

(1) 既往研究の調査

既往研究の調査の結果以下のことがわかった．時系列マルチスケール問題の場合，均質化法のような空間マルチスケール問題と異なり，完全な周期性を仮定することはできない．そこで，準周期関数（Almost periodic function）の概念を導入する必要がある．完全な周期性を持つ場合は周期関数（Periodic function）という．以下に，繰返し負荷を受ける弾塑性材料の変形（特に，塑性ひずみの蓄積）について周期関数と準周期関数の概念を簡単に述べる．

一般に，周期的な外力が物体に作用したとしても，物体内各点で発生する応力やひずみは非線形変形の影響によって完全に周期的にならない．例えば，相当塑性ひずみは単調増加関数なので，周期関数になり得ない．そのため，準周期関数の概念を導入する．

はじめに，周期関数について定義する．図 1 中に示す周期関数は，ミクロ時間τに関する周期κで振動する関数である．従って，任意の整数kに対して次式が成立する．

$$\phi(\boldsymbol{x},t,\tau)=\phi(\boldsymbol{x},t,\tau+k\kappa) \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

式（1）のような性質を持つ，周期関数を$\phi_p=\phi_p(\boldsymbol{x},t,\tau)$ と記す．

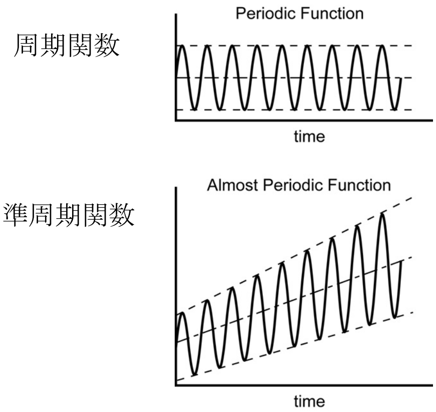


図 1　周期関数と準周期関数

一方，$\phi(\boldsymbol{x},t,\tau)$が図 1 中に示すような準周期関数（Almost periodic function）の場合，式（1）は成立せず，次の性質を持つ．

$$\begin{aligned}\phi(\boldsymbol{x},t,\tau+k\kappa)&=\phi(\boldsymbol{x},t,\tau)+O(\zeta)\\&=\phi(\boldsymbol{x},t,\tau)+\zeta\tau\overline{\phi}(\boldsymbol{x})\end{aligned} \quad\cdots\cdots\cdots (2)$$

式（2）のような性質を持つ関数を準周期関数（Almost periodic function）と定義し，$\phi_{ap}=\phi_{ap}(\boldsymbol{x},t,\tau)$ で表す．式（1）と（2）を比較すると，周期関数と準周期関数の間に次の関係を見出す．

$$\phi_{ap}(\boldsymbol{x},t,\tau)=\phi_p(\boldsymbol{x},t,\tau)+\zeta\tau\overline{\phi}(\boldsymbol{x}) \quad\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

次に，マルチスケール解析において必要になる平均化オペレータは，一般的に用いられる均質化オペレータ（周期関数のための均質化（Periodic Temporal Homogenization (PTH)）オペレータ：ではなく，準周期関数のための時系列均質化（Almost Periodic Temporal Homogenization (APTH)）オペレータの使用が適切とされる．PTH オペレータは関数の一周期あたりの平均として，次式で定義される．

$$\left\langle\phi_p(\boldsymbol{x},t,\tau)\right\rangle=\frac{1}{\kappa}\int_{\tau}^{\tau+\kappa}\phi_p(\boldsymbol{x},t,\overline{\tau})\mathrm{d}\overline{\tau} \quad\cdots\cdots\cdots (4)$$

APTH オペレータは，時間微分を平均化するオペレータとして定義される．

$$\frac{\partial M\left(\phi_{ap}(\boldsymbol{x},t,\tau)\right)(\boldsymbol{x},t)}{\partial t}=\left\langle\dot{\phi}_{ap}(\boldsymbol{x},t,\tau)\right\rangle(\boldsymbol{x},t) \quad\cdots (5)$$

式（5）で定義された ATPH オペレータにより各物理量の時間平均値を表す．

一方，弾塑性材料の疲労き裂進展解析に関する今までの研究は，一荷重サイクルごとに微小なき裂進展を仮定する．そのため，解析可能な荷重サイクル数が，有限要素法メッシュに支配されてしまう．この点については新規提案が必要である．

以上，既往研究の調査から，各物理量の時間平均値に対して APTH オペレータの使用を仮定し，速度型の定式化を行えば矛盾なく繰返し荷重問題に対する時系列マルチスケール解析の定式化が可能であるという見通しができた．また，節点解放アルゴリズムは従来法を踏襲せず，新規提案を行うこととした．

調査を行った代表的な文献は以下の通りである．

○J. Fish and C. Oskay, A nonlocal multiscale fatigue model, Mechanics of Advanced Materials and Structures, vol. 12, pp. 485-500, 2005.

○ P.F.P. de Motos, D. Nowell, Numerical simulation of plasticity-induced fatigue crack closure with emphasis on the crack growth scheme: 2D and 3D analyses, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 75, pp. 2087-2114, 2008.

(2) 時系列マルチスケール解析の定式化

APTH オペレータによる時間平均を使用し，関係する各物理量（応力σ_{ij}，ひずみε_{ij}，塑性ひずみε_{ij}^p，変位u_i，力学的境界条件$\overline{P}_i$(on $\partial\Omega_P$)，変位境界条件$\overline{u}_i$(on $\partial\Omega_u$)物体力 b_i）をマクロ時間に対して変動する平均成分とミクロ時間に対する変動に分解して表す．例えば，応力は次式のようになる．

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}^{\zeta}(\boldsymbol{x},t)&=\sigma_{ij}(\boldsymbol{x},t,\tau)\\&=M\left(\sigma_{ij}(\boldsymbol{x},t,\tau)\right)(\boldsymbol{x},t)+\tilde{\sigma}_{ij}(\boldsymbol{x},t,\tau)\end{aligned} \quad\cdot (6)$$

$M(\sigma_{ij})(\boldsymbol{x},t)$は応力$\sigma_{ij}$の平均成分，$\tilde{\sigma}_{ij}$はミクロ時間$\tau$に対する変動である．これらの分解から，ミクロ時間$\tau$に関する増分形弱形式を導くことができる．

$$\begin{aligned}&\int_{\Omega}\frac{\partial(\delta u_i)}{\partial x_j}F_{ijk\ell}^{ep}\left(\alpha,M(\sigma_{ij}),\tilde{\sigma}_{ij}^{I},M(\overline{\varepsilon}^{p}),\tilde{\overline{\varepsilon}}^{pI}\right)\Delta\tilde{\varepsilon}_{k\ell}^{I}\mathrm{d}\Omega\\&=\int_{\mathrm{d}\Omega_p}\delta u_i\left\{M\left(\overline{P}_i(\boldsymbol{x},t,\tau)\right)(\boldsymbol{x},t)+\tilde{\overline{P}}_i^{I}(\boldsymbol{x},t,\tau)\right\}\mathrm{d}\Omega_p\\&-\int_{\Omega}\frac{\partial(\delta u_i)}{\partial x_j}\left\{M(\sigma_{ij})+\tilde{\sigma}_{ij}^{I-1}\right\}\mathrm{d}\Omega\end{aligned} \quad\cdot\cdot (7)$$

式（7）に基づき，ミクロ時間に対する増分型有限要素法解析を行う．なお，$F^{ep}_{ijk\ell}\left(\alpha, M(\sigma_{ij}), \tilde{\sigma}^I_{ij}, M(\bar{\varepsilon}^p), \tilde{\bar{\varepsilon}}^{pI}\right)\Delta\tilde{\varepsilon}^I_{k\ell}$ は応力の時間発展方程式を表す．パラメータ α は塑性負荷状態にあれば 1，弾性除荷重状態で 0 をとる．さらに，応力の時間発展がひずみ履歴や現在の応力値に依存することを表している．具体的には，J2-F 理論などに従う時間発展式として表現される．各変数，例えば $\tilde{\sigma}^I_{ij}$ の肩添え字 I はミクロ時間に関する増分ステップ数である．

マクロ時間に関する有限要素法解析の弱形式は次のようになる．

$$
\begin{aligned}
&\int_\Omega \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} E_{ijk\ell} \Delta M(\varepsilon_{k\ell})^J \Delta M(\varepsilon_{pq})^J \,\mathrm{d}\Omega \\
&= \int_{\partial\Omega_t} \delta u_i \left\{M(\overline{P}_i)^J - M(\overline{P}_i)^{J-1}\right\} \mathrm{d}(\partial\Omega_t) \\
&+ \Delta t^J \int_\Omega \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} N E_{ijk\ell} \left[\tilde{\varepsilon}^p_{k\ell}(\boldsymbol{x}, t, \kappa) - \tilde{\varepsilon}^p_{k\ell}(\boldsymbol{x}, t, 0)\right] \mathrm{d}\Omega
\end{aligned}
\quad \cdots (8)
$$

マクロ時間に関する解析は，右辺第二項で塑性ひずみ増分を初期ひずみ項として取り入れるが，線形弾性解析である．

本節の内容が，本研究において最も本質的かつ重要な研究成果である．

(3) 時系列マルチスケール解析によるき裂進展解析手法（計算手順）の検討

き裂が 1 要素長分進展する際，多数の繰返し荷重サイクルを要すると仮定する．すなわち，1 き裂節点解放の間に多数の繰返し荷重サイクルが存在する．そこで，一つのき裂節点を解放する際に時系列マルチスケール解析手法を適用し，サイクルジャンプによって数荷重サイクルの解析だけで 1 き裂節点の解放を可能にする．

図 2 にき裂節点解放のためのサイクルジャンプのイメージ図を表す．解放するき裂節点に対して，変位拘束を受けていた前き裂進展ステップで得られた節点荷重を徐々にゼロとするような節点荷重制御を行う．本研究では繰返し荷重を与えていることを除けば，一般的な節点解放法によるき裂進展解析と同じである．

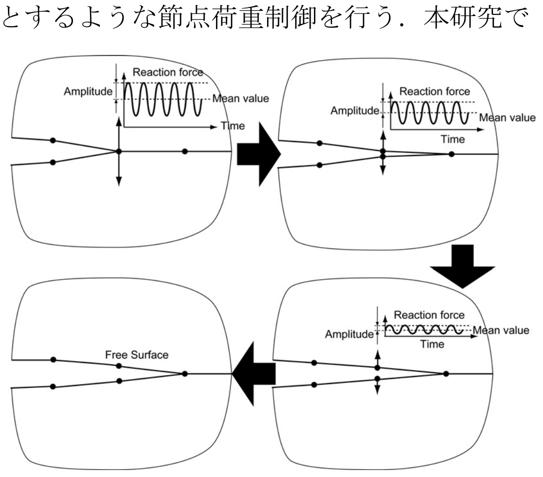


図２　節点解放法によるき裂進展解析

き裂を解放するき裂面（要素の辺）の参照き裂節点荷重履歴に対応するき裂面のトラクションを $\overline{P}^{\mathrm{Crack}}_i(\boldsymbol{x}, t_o, \tau)$ で表す．ここで，t_o は参照するマクロ時刻を表す．き裂解放を表すためのファクター $f^{\mathrm{Crack}}(t,\tau)$ を導入し，時刻 t（$t_o \le t \le t_o + \Delta t$）におけるトラクション $\overline{P}^{\mathrm{Crack}}_i(\boldsymbol{x}, t, \tau)$ を次式で表す．

$$
\overline{P}^{\mathrm{Crack}}_i(\boldsymbol{x}, t, \tau) = f^{\mathrm{Crack}}(t,\tau)\overline{P}^{\mathrm{Crack}}_i(\boldsymbol{x}, t_o, \tau) \cdot (9)
$$

$f^{\mathrm{Crack}}(t,\tau)$ は次の性質を満足する．

$$
\begin{aligned}
&f^{\mathrm{Crack}}(t_o, \tau = 0) = 1 \\
&f^{\mathrm{Crack}}(t_o + \Delta t, \tau = 0) = 0
\end{aligned}
\quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (10)
$$

き裂進展のミクロ時間に関する解析は，式（9）で示されたき裂面トラクションを境界条件として行う．次式において，$\partial\Omega_{\mathrm{Crack}}$ はトラクションを解放するき裂面を表す．

$$
\begin{aligned}
&\int_\Omega \frac{\partial(\delta u_i)}{\partial x_j} F^{ep}_{ijk\ell}\left(\alpha, M(\sigma_{ij}), \tilde{\sigma}^I_{ij}, M(\bar{\varepsilon}^p), \tilde{\bar{\varepsilon}}^{pI}\right)\Delta\varepsilon^I_{k\ell}\,\mathrm{d}\Omega \\
&= \int_{\mathrm{d}\Omega_p} \delta u_i \left\{M\left(\overline{P}_i(\boldsymbol{x}, t, \tau)\right)(\boldsymbol{x}, t) + \tilde{\overline{P}}^I_i(\boldsymbol{x}, t, \tau)\right\} \mathrm{d}\Omega_p \\
&- \int_\Omega \frac{\partial(\delta u_i)}{\partial x_j}\left\{M(\sigma_{ij}) + \tilde{\sigma}^{I-1}_{ij}\right\} \mathrm{d}\Omega \\
&+ \int_{\partial\Omega_{\mathrm{Crack}}} f^{\mathrm{Crack}}(t,\tau)\overline{P}^{\mathrm{Crack}}_i(\boldsymbol{x}, t_o, \tau)\,\mathrm{d}(\partial\Omega_{\mathrm{Crack}})
\end{aligned}
\quad (11)
$$

マクロ時間に関する解析は，式（11）で与えられたき裂面トラクションを考慮して実行する．すなわち，式（8）に解放するき裂面トラクションに係わる項を追加する．

$$
\begin{aligned}
&\int_\Omega \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} E_{ijk\ell} \Delta M(\varepsilon_{k\ell})^J \Delta M(\varepsilon_{pq})^J \,\mathrm{d}\Omega \\
&= \int_{\partial\Omega_t} \delta u_i \left\{M(\overline{P}_i)^J - M(\overline{P}_i)^{J-1}\right\} \mathrm{d}(\partial\Omega_t) \\
&+ \Delta t^J \int_\Omega \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} N E_{ijk\ell} \left[\tilde{\varepsilon}^p_{k\ell}(\boldsymbol{x}, t, \kappa) - \tilde{\varepsilon}^p_{k\ell}(\boldsymbol{x}, t, 0)\right] \mathrm{d}\Omega \\
&+ \Delta t^J \int_{\partial\Omega_{\mathrm{Crack}}} N\left[f^{\mathrm{Crack}}(t,\kappa) - f^{\mathrm{Crack}}(t,0)\right]\overline{P}^{Crack}_i(t_o, 0)\,\mathrm{d}(\partial\Omega_{\mathrm{Crack}})
\end{aligned}
$$

$$
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12)
$$

式（12）右辺第二項と第三項はほぼ同じ式変形の結果導かれるものである．

(4) 一次元問題解析による定式化の検証

解析手法検証のための，仮想的な一次元問題を設定した．図 3 に一次元問題を仮定した荷重サイクルとともに示す．平均荷重はゼロとし，荷重振幅が荷重サイクル数に比例して増加する場合と，荷重振幅が一定のまま平均荷重が荷重サイクル数に比例して増加する

二つの場合を仮定した．材料の応力-ひずみ関係は線形硬化則を仮定した．材料のヤング率は 10000 MP，降伏応力 100 MPa，加工硬化率 1000 MPa である．時系列マルチスケール解析では，はじめの 10 荷重サイクルのミクロ時間解析を行った後，250 荷重サイクルのジャンプ（マクロ時間解析）と，1 荷重サイクルのミクロ時間解析を繰返した．また，1 荷重サイクルをサイン波状とし，100 等分した荷重ステップに分けてミクロ時間に関する増分計算を行っている．

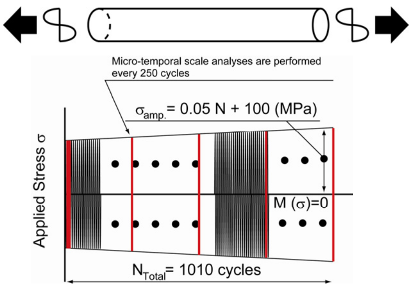
図 4 に荷重振幅が荷重サイクル数に比例して増加する場合に関する計算結果の概要を示す．図 4 では直接計算の結果を実線で示し，時系列マルチスケール解析との比較を行った．ただし，ひずみのように 1 サイクル毎に変動する量は，各荷重サイクルの最大値と最小値だけを曲線で繋ぎ示している．相当塑性ひずみやひずみの値が直接計算と時系列マルチスケール解析でよく一致することがわかった．

さらに，荷重振幅が一定のままで，その平均値が増加する場合の解析結果を図 5 に，図 4 と同様なフォーマットで示す．前者と同様，直接解析と時系列マルチスケール解析でよく一致している．

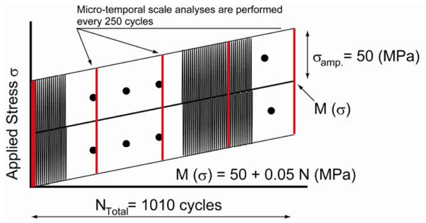
(5) 時系列マルチスケール手法のコンピュータプログラム実装と実証解析

提案の時系列マルチスケール解析手法を弾塑性有限要素法プログラムに実装し，例題解析を行った．図 6 に解析対象とした境界値問題を示す．繰返し荷重を受ける弾塑性材料からなる円孔付帯板の問題である．問題の対称性を利用し，1/4 部分の解析を実施している．使用した有限要素法モデルも図 6 中に示す．繰返し分布荷重を解析モデル上端に与えた．荷重の荷重サイクルに対する変動を図 7 に示す．繰返し荷重の平均値は常にゼロ，ゼロサイクルから 1000 サイクルまで，降伏応力の 31.25%から 43.75 %まで線形的に増加する荷重振幅を仮定した．また，平面ひずみ状態を仮定し，材料定数は前節の一次元検証問題と同じである（ただし，ポアソン比は 0.3）．

全ての荷重サイクルについて解析を行う直接解析と時系列マルチスケール解析を実施し，円孔縁から発生する塑性ひずみの分布



(a) 荷重振幅が荷重サイクル数に比例して増加



(b)平均値が荷重サイクル数に比例して増加

図 3　一次元検証問題（仮定した繰返し荷重）

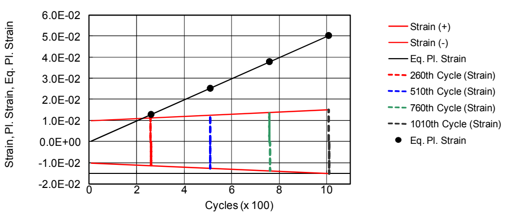


図 4　振幅が荷重サイクル数に比例する場合の計算結果（ひずみ、相当塑性ひずみ）

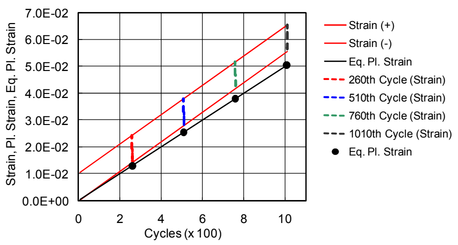


図 5　平均値が荷重サイクル数に比例する場合の計算結果（ひずみ、相当塑性ひずみ）

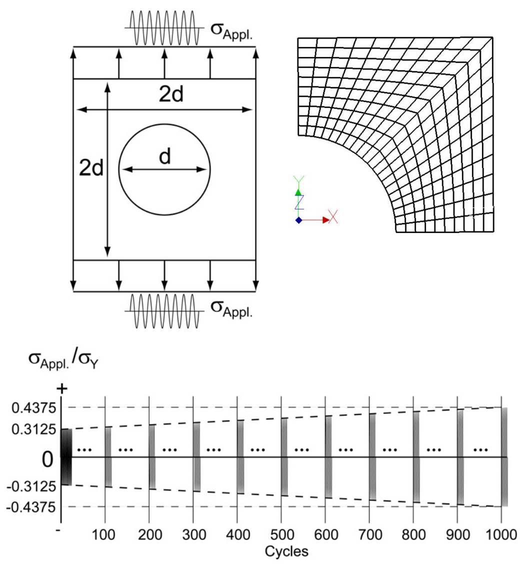


図 6　時系列マルチスケール手法による応力集中問題解析の例題（境界値問題，有限要素法メッシュ，繰返し荷重プロファイル（荷重振幅と荷重サイクル数の関係）

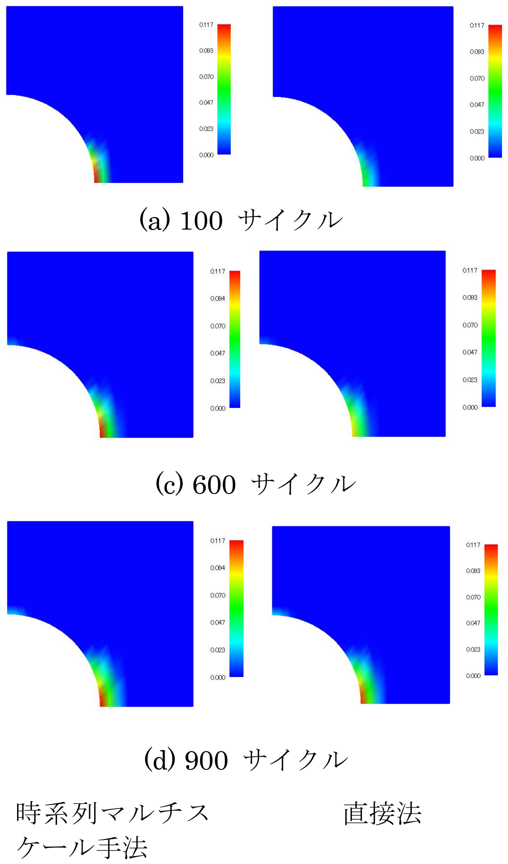


図 7　応力集中問題における相当塑性ひずみ分布 (時系列マルチスケール手法と直接解法の比較)

状態について両者の結果を比較した．時系列マルチスケール解析では，始めの 20 荷重サイクル分のミクロ時間解析を行った後，100 荷重サイクル目から 5 荷重サイクルのミクロ時間解析，さらに，95 荷重サイクルのジャンプと 5 荷重サイクルの解析を繰返した．

図 7 に時系列マルチスケールと直接解析による相当塑性ひずみ分布について比較する．時系列マルチスケール解析の場合，100 荷重サイクル目までで円孔縁の塑性ひずみが直接解析の場合と比較して大きく進行していく．これは，円孔縁で最初に塑性変形が発生し，その初期段階におけるマクロ時間に対する速度をもとに時系列マルチスケール手法によるサイクルジャンプを行った結果，オーバーシュートが発生したものと思われる．しかながら，円孔縁から若干離れた位置における相当塑性ひずみは両者で似た傾向を示す．

荷重振幅を増やし，荷重振幅をゼロサイクル目で降伏応力の 37.5%，1000 サイクル目で 52.5%とした場合でも同様な結果であった．

オーバーシュートの原因は，塑性ひずみのサイクルジャンプ（式（8）のフォワードオイラー的時間積分）に起因すると思われる．

(6) まとめ

ひずみ履歴に依存する，繰返し負荷を受ける弾塑性材料の時系列マルチスケール解析に関する研究を行った．以下の成果を得た．

〇時系列マルチスケール解析の定式化

〇時系列マルチスケール法による疲労き裂進展解析の定式化

〇一次元検証問題による定式化の妥当性検証の実施

〇有限要素法解析プログラムへの実装と例題解析の実施

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計 4 件）

① H. Okada and S. Kondo, Toward Structural Integrity Analyses based on a Temporal Multisclae Scheme, International Conference on Computational and Experimental Engineering & Sciences, 2008 年 3 月 18 日，アメリカ合衆国ホノルル市

② 近藤俊平，岡田　裕　時系列マルチスケール法による弾塑性材料の繰返し負荷問題の有限要素法解析，日本機械学会中国四国支部　第 46 期総会・講演会　2008 年 3 月 7 日　東広島市

③ Hiroshi Okada, Fully automated 3D-crack propagation analyses based on tetrahedral finite elements, 8th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM8), 2008 年 7 月 1 日，イタリア，ベネチア

④ 岡田　裕，時系列マルチスケール手法による繰返し負荷を受ける弾塑性材料の解析 (疲労と疲労き裂進展解析を目指して)，日本機械学会，M&M 材料力学カンファレンス（CD-ROM），2008 年 9 月 18 日滋賀県草津市

６．研究組織

(1)研究代表者

岡田　裕（OKADA Hiroshi）

鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：50281738

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし