

# SiC 被膜付 C / C 複合材の均質化法による熱応力解析\*

青木 由雄\*<sup>1</sup>, 遠藤 修司\*<sup>1</sup>

## Analysis of Thermal Stress by Homogenization Method for SiC Coated Carbon-carbon Composites. \*

Yoshio AOKI \*<sup>1</sup>, Shuuji ENDO \*<sup>1</sup>

### ABSTRACT

Carbon-carbon composites coated with silicon carbide (SiC) were planned to be used as material for the thermal protection structures of space planes. However, residual thermal stress caused many cracks in the SiC layer when cooled to room temperature after the CVD coating process at 1250°C. At the first step to prevent the nucleation of cracks, the residual thermal stress of the coated specimen was calculated by the finite element method, and it was found that the tensile stress in the SiC layer exceeded the tensile strength of SiC. To solve this problem, a 3D fabric composite consisting of SiC fiber in XY-plane, and carbon fiber in Z-direction was developed, which enabled the creation of an SiC coating without cracks in a 40 mm square specimen. The next step is the application of this composite to a large-scale structure and the reduction of the weight/strength ratio. To evaluate the stress of a structure made of this composite, a homogenization method which makes it possible to analyze the stress both in macroscopic and microscopic level was introduced to the finite element code. Thermal stress in the 40 mm squared specimen was calculated by this code, and it was confirmed that the homogenization method provided reasonable solutions for the experimental result.

**Keywords**: Homogenization method, FEM, Residual stress, Carbon/Carbon composite, SiC coating

### 概 要

宇宙往還機用の耐熱構造材として SiC 被膜付 C / C 複合材が検討されているが、高温での CVD (化学気相蒸着) による成膜後、残留応力によって完成後の SiC 被膜表面には多くのクラックが発生する。このクラック防止の為、まずは残留応力解析を行ない、SiC 被膜の残留応力とその破断強度をはるかに上回る値であることを確認した。そこで平面内方向の繊維に SiC を採用した 3次元織の基材を開発したところ、試験片テストにおいてはクラック防止が実現された。次の段階として、この材料の一般構造物への適用、また基材の高比強度化を目指しているが、その設計検討の為、構造物全体のマクロなレベルでの応力状態と、構造物の任意の点におけるミクロなレベルでの応力状態を同時に解析できる均質化法を採り入れた計算コードを作成した。そのコードを用いて 40mm 角試験片を対象とした熱応力解析を行ない、実験データとの比較から手法の有効性を確認した。

---

\* 平成 13 年 4 月 5 日受付 (received 4 April, 2001)

\*<sup>1</sup> 構造材料総合研究グループ (Structures and Materials Research Center)

## 第1章 緒言

宇宙往還機用の耐熱構造材としてC/C複合材は有力な候補材料の1つである。しかしながら、このC/C複合材料の高温環境下での破壊挙動は極めて複雑で、宇宙機への実用化にあたってはその破壊機構を明らかにしておくことが必要である。

特にSiC被膜付C/C複合材については、高温においてCVDで耐酸化被膜を成膜後、室温まで冷却する際、耐酸化被膜のSiCとC/C基材の熱膨張係数の違いより、被膜と基材の双方に熱応力が発生する。そのため、完成後のSiC被膜表面には多くのクラックが認められる。

この成膜後のクラック発生のない材料を開発し構造物に適用していく為、以下に述べるような数値計算による検討を行なった。

先ず第2章においては、クラックが発生しているSiC被膜付C/C材の試験片を対象として、成膜後の常温における残留応力の解析を行ない、応力状態の把握を行なった。また、今後解析をする際のモデル作成の指針とする為、C/C基材部を一樣な直交異方性材料と仮定したマクロモデルと、基材のミクロな構造を忠実に表現したミクロモデルの2種類のモデルでの解析を行なって結果の比較をした。

第2章での計算結果から、SiC被膜の残留応力はSiC被膜の破断強度をはるかに超える値である事がわかった。そこでクラック防止対策として、XY方向(基材平面内)繊維にSiC、Z方向(基材厚さ方向)繊維にC、及びマトリックスにCを採用した新たな3次元繊維基材を開発し、40mm角試験片でテストを行なったところ、成膜後の常温においても、また室温~1700℃の熱サイクルテストでも、被膜にクラックが発生しないことが確認された。

そこで次の段階として、この材料を翼前縁部のような一般構造物に適用し、またさらには材料の高比強度化を実現すべく基材の組成・織構造の改良を目指している。その為には構造物全体のマクロなレベルでの応力状態と、構造物の任意の点におけるミクロなレベルでの応力状態を同時に把握して、基材と構造物とを設計していく必要がある。その為、例えば翼前縁部のような構造物全体について、基材繊維の織構造までを忠実に表現したメッシュを作成して数値解析すると、そのメッシュ数は膨大となり現実的ではない。

そのような膨大なメッシュを作成することなくマクロ・ミクロ両レベルでの応力解析を可能にする方法として、均質化法という手法がある。均質化法とは、複合材のように異種の素材の組み合わせで構成される不均質な材料で、かつ同じパターンでのミクロ構造が無数に集まってきているものに適用できる手法である。

第3章では、この均質化法を有限要素法に採り入れて計算コードを作成し、40mm角試験片を対象とした応力解析を行ない、実験データとの比較から手法の妥当性を確認した。また、現状の基材の40mm角試験片を用い、マクロレベルからミクロレベルでの応力状態を把握して、この基材を一般構造物に適用する上で、基材改良の資料とする。

## 第2章 SiC被膜付C/C基材の残留応力解析

### 2.1 解析の概要

CVDによる成膜後、常温においてクラックの発生しているSiC被膜付C/C材試験片を対象とし、主として以下の2点に着目して応力解析を行なった。

- (1) 成膜後の常温における残留応力の解析を行ない、応力状態の把握を行なった。
- (2) 今後解析をする際のモデル作成の指針とする為、C/C基材部を一樣な直交異方性材料と仮定したマクロモデルと、基材のミクロな構造を忠実に表現したミクロモデルの2種類のモデルで(1)の解析を行ない、結果の比較をした。

尚、解析コードとしては有限要素法弾性解析プログラム(株)計算力学研究センター製ASTEAMACSを用いた。

### 2.2 解析対象

厚さ2.4mm×巾20mm×長さ75mmの平織C/C基材に厚さ0.05mmのSiCコーティングを施した試験片を解析対象とした。

### 2.3 解析条件

ミクロモデル・マクロモデル共、1250℃に一樣に加熱されたC/C基材表面に、CVDでSiC被膜が形成された時点で試験片全体が無応力状態であるとし、その後20℃まで冷却した場合の熱応力を求めた。また物性値の温度依存性はないものとした

#### (1) マクロモデル

解析モデル及び寸法を図2-1に示す。解析対象物の対称性を考慮し、図に示す1/8モデルで解析を行なった。また拘束条件は、 $X=0$ 、 $Y=0$ 、 $Z=0$ の面でそれぞれX方向、Y方向、Z方向拘束とした。

物性値を表2-1に示す。C/C基材を直交異方性材料とし、SiC被膜を等方性材料としている。

#### (2) ミクロモデル

解析モデル及び寸法を図2-2に示す。解析対象の試験片から図に示す領域を取り出してモデル化を行った。対称性を考慮して拘束条件は、 $X=0$ 、 $Y=0$ 、 $Z=0$ の面でそれぞれX方向、Y方向、Z方向拘束とした。また

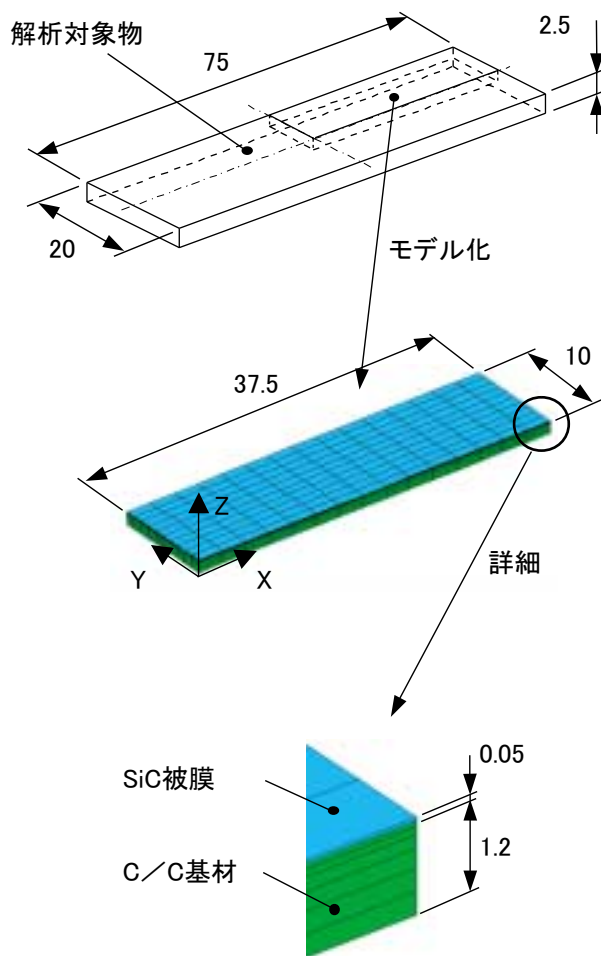


図2-1 マクロモデル解析モデル図 (単位: mm)

表2-1 マクロモデル物性値

	SiC (※1)	C/C基材 (※2)
ヤング率 (GPa)	390	$E_x$ : 83.0 $E_y$ : 83.0 $E_z$ : 10.0
せん断弾性係数 (GPa)	168	$G_{xy}$ : 4.0 $G_{yz}$ : 4.0 $G_{zx}$ : 4.0
ポアソン比	0.16	$\nu_{xy}$ : 0.03 $\nu_{yz}$ : 0.03 $\nu_{zx}$ : 0.03
線膨張係数 ( $\times 10^{-6}$ )	4.2	$\alpha_x$ : 0.2 $\alpha_y$ : 0.2 $\alpha_z$ : 5.7

※1) 宇部興産社提供  
 ※2) 日本カーボン社提供

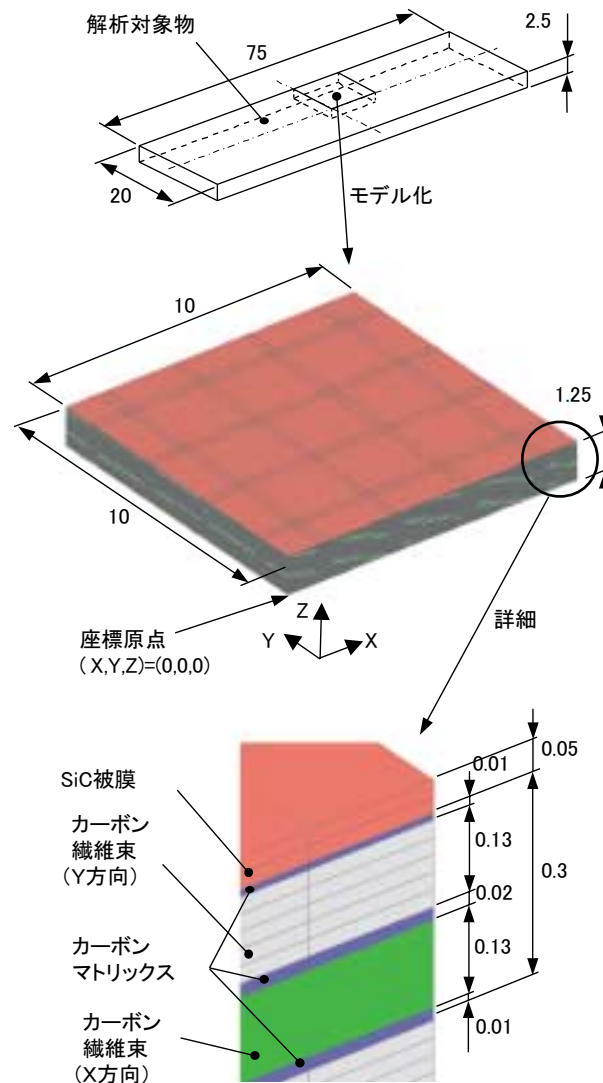


図2-2 ミクロモデル解析モデル図 (単位: mm)

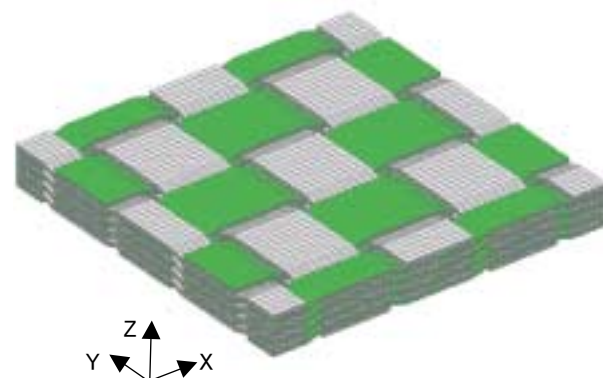


図2-3 ミクロモデルカーボン繊維束部メッシュ図

表 2-2 ミクロモデル物性値 (1)

	SiC (※1)	カーボン (※2) (マトリックス)	カーボン (繊維) (※2)
ヤング率 (GPa)	390	6.0	280
ポアソン比	0.16	0.2	0.2
線膨張係数 ( $\times 10^{-6}$ )	4.2	5.7	0.8

※1) 宇部興産社提供  
 ※2) 日本カーボン社提供

図 2-3 にカーボン繊維束部のみを取り出したものを示す。繊維束とマトリックス間は密着し、すべりはないものとしている。

SiC 被膜及び C/C 材のマトリックス部は等方性材料とし、表 2-2 のような物性<sup>1)</sup> を用いた。カーボンマトリックスの物性については不明のため以下のように仮定した。

- ・ヤング率：カーボン繊維の約 100 分の 1 程度とした。
- ・ポアソン比：0.2 とした。
- ・線膨張係数：表 2-1 の C/C 基材の厚さ方向の線膨張係数と等しいとした。

C/C 材の繊維束部はカーボン繊維とカーボンマトリックスからなる 1 方向繊維複合材とし、その繊維とマトリックスの構成比は以下のようにして算出した。

本解析モデルにおいて、繊維束部として定義されている部分の体積が、C/C 材全体の体積に占める割合は 0.69。これに対し C/C 材の  $V_f=0.55$  であるので、解析モデルにおいても  $V_f=0.55$  とするため、繊維束部においてカーボン繊維の占める割合を  $\alpha$  とし以下の通り  $\alpha$  を求めた。

$$0.69 \times \alpha = 0.55$$

$$\alpha = 0.80$$

1 方向繊維複合材の応力-歪関係式は以下で与えられる。添字の  $L$  は繊維方向、 $T$  は繊維直角方向を示す。仮に  $X$  軸を繊維方向とすると

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E_L} \sigma_x - \frac{v_{TL}}{E_T} \sigma_y - \frac{v_{TL}}{E_T} \sigma_z \\ \varepsilon_y = \frac{v_{LT}}{E_L} \sigma_x + \frac{1}{E_T} \sigma_y - \frac{v_{TT}}{E_T} \sigma_z \\ \varepsilon_z = -\frac{v_{LT}}{E_L} \sigma_x - \frac{v_{TT}}{E_T} \sigma_y + \frac{1}{E_T} \sigma_z \\ \gamma_{xy} = \frac{1}{G_{LT}} \tau_{xy} \\ \gamma_{yz} = \frac{1}{G_{TT}} \tau_{yz} \\ \gamma_{zx} = \frac{1}{G_{LT}} \tau_{zx} \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

表 2-3 ミクロモデル物性値 (2)

	繊維束部
$E_L$ (GPa)	230
$E_T$ (GPa)	28
$G_{LT}$ (GPa)	12
$G_{TT}$ (GPa)	12
$\nu_{LT}$	0.2
$\nu_{TL}$	0.02
$\nu_{TT}$	0.2
線膨張係数 ( $\times 10^{-6}$ )	繊維方向：0.2 繊維直角方向：5.7

上式の 7 個の弾性係数 (うち独立なものは 5 個) はカーボン繊維単体の物性 (表 2-2) と、カーボンマトリックス単体の物性 (表 2-2) から複合則<sup>2), 3)</sup> により表 2-3 の通り定めた。

線膨張係数については複合則によらず、表 2-1 の C/C 基材の値をそのまま用いた。

2.4 解析結果と考察

(1) マクロモデルとミクロモデルの解析結果比較

① SiC 被膜表面の応力分布

図 2-4, 5 にそれぞれマクロモデルとミクロモデルの

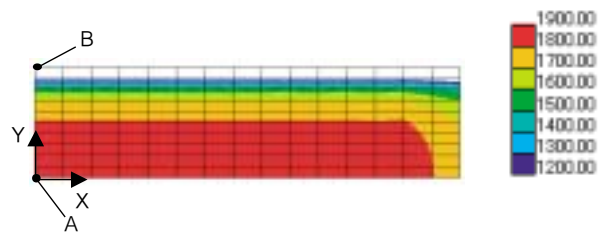


図 2-4 マクロモデル SiC 被膜表面の  $\sigma_y$  分布図 (単位: MPa)

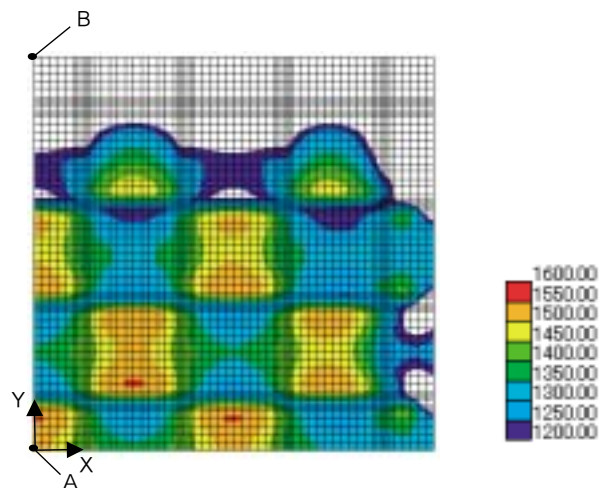


図 2-5 ミクロモデル SiC 被膜表面の  $\sigma_y$  分布図 (単位: MPa)

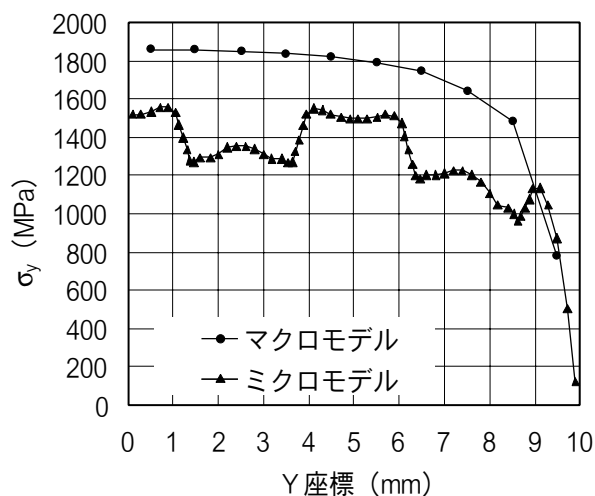


図2-6 ミクロ・マクロ両モデルのX=0におけるSiC被膜表面の $\sigma_y$ 分布の比較

SiC被膜表面における $\sigma_y$ の分布を示す。マイクロモデルにおいては、C/C基材表面の繊維方向の影響を強く受け、分布が不均一となっている。C/C基材表面の繊維がY方向になっている場所で $\sigma_y$ が大きくなっている。

マクロ・マイクロ両モデルについて、X=0におけるSiC被膜表面の $\sigma_y$ の分布の比較をしたのが、図2-6のグラフである。マイクロモデルの場合、端部から充分内側に入った所で約300 (MPa) の不均一が生じている。これをマクロモデルの分布と比較した場合、マイクロモデルの分布を平均化して、約300 (MPa) 上方にシフトすると、マクロモデルの分布とほぼ一致する。

SiC被膜表面の $\sigma_y$ は、ほぼC/C基材のY方向繊維束にかかる圧縮力の反力として現れているが、Y方向繊維束が、Y方向に圧縮を受けると繊維束は単純に繊維方向に圧縮変形するだけでなく、面外にジャバラ状に変形し、Y方向に縮む変形を許されている。よって、その分SiC被膜表面の $\sigma_y$ は緩和されると考えられる。したがって上記の結果は定性的には妥当な結果といえる。またどちらのモデルにおいても、SiC被膜表面の $\sigma_y$ はSiCの破断強度320 (MPa) をはるかに越えていることがわかる。

なお、本強度値は実験値である。

## ② C/C基材内部の応力分布

図2-4, 5のA点(試験片中心)における $\sigma_y$ のZ方向の分布を図2-7に示す(SiC被膜部の値は省いてある)。マイクロモデルでは、繊維方向がX方向の場合は $\sigma_y < 0$ 、Y方向の場合は $\sigma_y > 0$ となり大きな不均一が生じている。マイクロモデルの分布を平均化すると、ほぼマクロモデルの分布と一致している。

また、C/C基材内部のせん断応力は、試験片端部で最大となるが、図の2-4, 5のB点における $\tau_{yz}$ のZ方向の分布を図2-8に示す。マイクロモデルでは多少の不

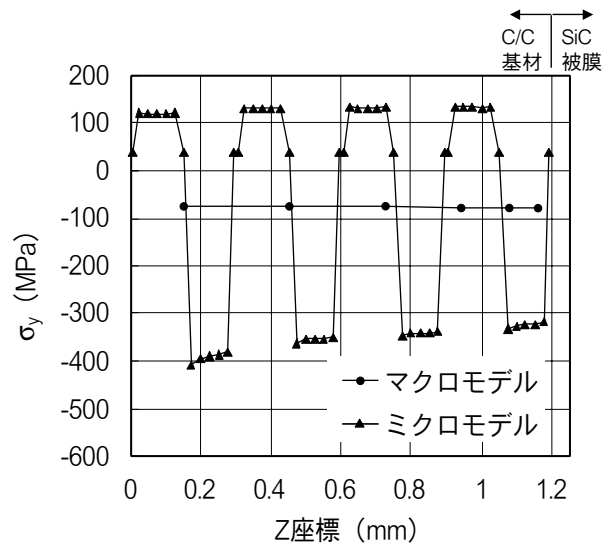


図2-7 ミクロ・マクロ両モデルの試験片中心(図2-4, 5中Aの点)におけるC/C基材内部の $\sigma_y$ 分布の比較

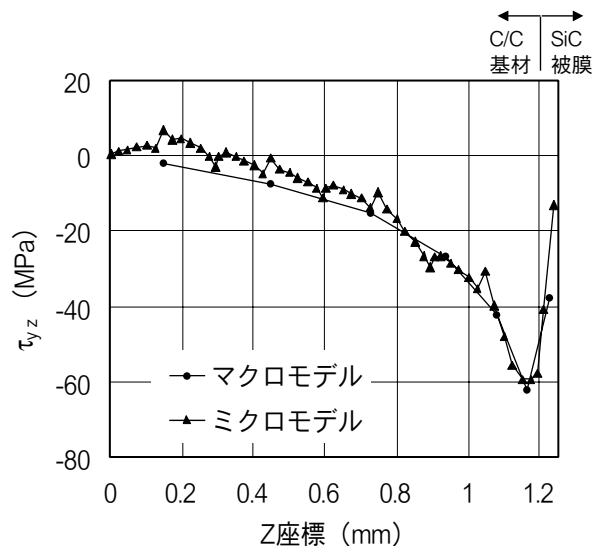


図2-8 ミクロ・マクロ両モデルの試験片端部(図2-4, 5中Bの点)における $\tau_{yz}$ 分布の比較

均一が生じているが、ほぼマクロモデルの分布と一致している。

## (2) SiC被膜の割れ現象との関連

現状においては、SiC被膜付きC/C材は、コーティングプロセス時の熱応力によって、SiC被膜に微視的な割れが生じた状態で創製される。これに熱サイクルを負荷すると、SiC被膜のひび割れ箇所は割れが拡大される。割れの起こりやすい場所は図2-9の楕円マークで示した、基材繊維束の交差する箇所の上のSiC被膜となっている。実例として図2-10にSiC被膜の割れの拡大した状況、図2-11にその直下の基材繊維の状況を示す。

このSiC被膜の割れ現象が今回解析したコーティング

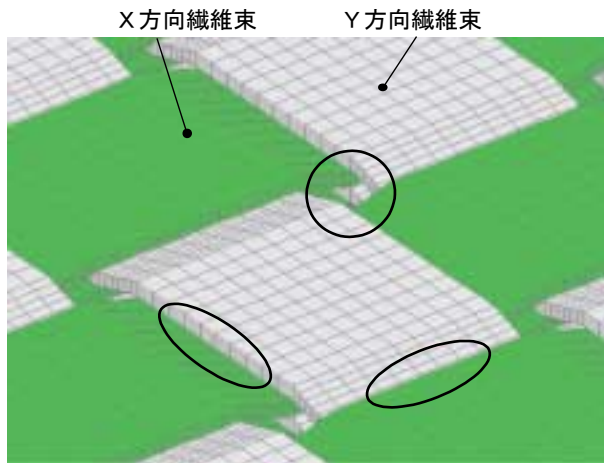


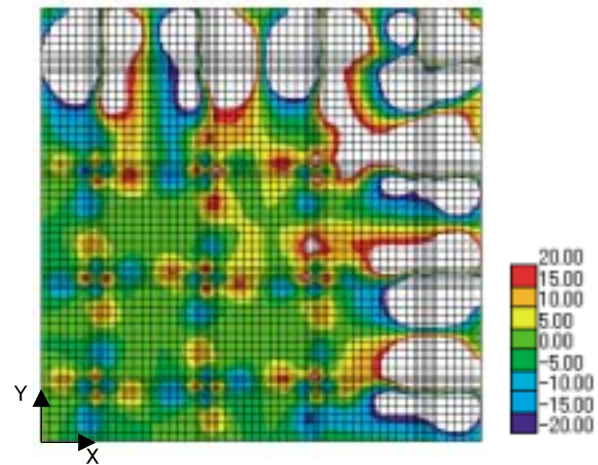
図2-9 SiC被膜の割れの起こり易い場所



図2-11 直下の基材繊維の状況



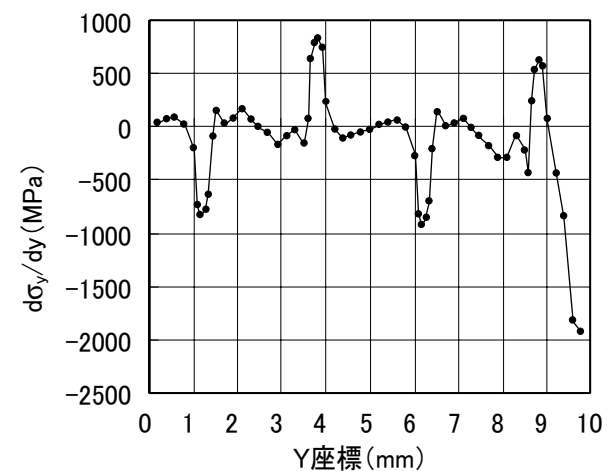
図2-10 SiC被膜の割れ発生状況

図2-12 ミクロモデルSiC被膜表面の $\tau_{xy}$ 分布図  
(単位: MPa)

プロセス時の残留応力と関連がないか調べてみた。

図2-12にSiC被膜表面におけるせん断応力 $\tau_{yz}$ の分布を示す。端部の影響を無視するため、コンタ図のレンジを充分内に入った領域での分布に合わせてある。図2-3と照合させてみると、繊維の交差する場所の上で $\tau_{yz}$ が大きくなっていることがわかる。また、 $X=0$ におけるSiC被膜表面の $\sigma_y$ のY方向変化率を図2-13に示す。やはり、繊維の交差する箇所の上で、値が大きくなっている。

従って、コーティングの割れが熱負荷で拡大する主な原因は、これらの応力に依存すると考えられるのでC/C基材の織構成を改良する必要があると考える。

図2-13 ミクロモデル $X=0$ におけるSiC被膜表面の $\sigma_y$ のY方向勾配分布

### 第3章 均質化法を用いた SiC 被膜付 SiC - C / C 基材の熱応力解析

#### 3.1 解析の概要

SiC - C / C の3次元織基材の開発によって、40mm 角試験片の熱サイクルテストでは、SiC 被膜のクラック防止が実現できた。次の段階としてこの基材の一般構造物への適用を目指しているが、その為には構造物全体のマクロなレベルでの応力状態と、構造物の任意の点におけるミクロなレベルでの応力状態を同時に把握して、基材と構造物とを設計していく必要がある。

そこでこの章では、均質化法という手法を有限要素法に採り入れて計算コードを作成し、応力解析を行なった。40mm 角試験片を対象とし、主として以下の2点に着目した。

- (1) 常温における SiC 被膜の残留応力、及び基材の線膨張係数については実測データがあるので、計算結果と比較し計算手法の妥当性を確認した。
- (2) 現状の基材でできた 40mm 角試験片での、マクロレベルからミクロレベルにいたる応力状態を把握して、今後この基材を一般構造物に適用する上で、基材自体を改良していく際の参考データとする。

#### 3.2 均質化法の概要

均質化法<sup>5~11</sup>とは、複合材のように異種の素材の組み合わせで構成される不均質な材料で、かつ同じパターンのミクロ構造が無数に集まってできているものに適用できる手法である。

例えば、1方向繊維強化材は図3-1のようなミクロ構造がxyz3方向に無数に積み重なってできていると考えられることができるが、均質化法はこのような同じパターンのミクロ構造の集合体に適用できる。

(1) 解析の手順を1方向繊維強化材を例にとって説明すると

- ① 図3-1に示されているようなミクロ構造1周期分のモデルを作成する。このモデルをユニットセルと呼ぶ。

- ② ユニットセルモデルを用いて、ユニットセルが無数に集まった場合の全体としての平均的な物性(=均質化された物性)を求める。

- ③ ②で求めた物性を用いて、1方向繊維強化材でできている構造物のマクロモデルでの計算を行ない、マクロモデルでの応力・歪状態を求める。

- ④ マクロモデルでの任意の点の歪状態から、その点におけるミクロな構造での応力・歪状態を求める。

均質化法の大きな特長としては、均質化物性を求めてマクロな計算結果を得るだけでなく、上記④にあるようにマクロな結果をミクロな計算結果にフィードバックできる点にある。

#### (2) 計算方法

(1)において、均質化物性を求めマクロモデルの結果をミクロモデルにフィードバックする際の具体的な計算方法及びその理論を以下に述べる。計算式の導出方法については文献<sup>4) 5) 6) 7)</sup>を参照されたい。

- ① ミクロ構造1周期分(ユニットセル)はマクロ構造に比べ、充分小さいとする。そのスケールングファクターを $\varepsilon$ とおく。即ち $\varepsilon \ll 1$ となる。

- ② 任意の点の位置は、ユニットセル内でのその点の位置を表す座標 $y$ と、その点が属するユニットセルがマクロ構造内でどの位置にあるかを表す座標 $x$ の2つの座標によって表される。

- ③ 従って任意の点の変位 $u$ もこの2つの変数の関数となっているので $u(x,y)$ とおける。そして $u(x,y)$ は任意の $x$ 近傍で $y$ に関し周期的であるとする。

- ④ 解析対象物のある条件下における変形状態はこの $u(x,y)$ に仮想仕事の原理を適用すれば得られるが、その解 $u(x,y)$ について以下⑤⑥の2つのことがいえる。

- ⑤  $\varepsilon \rightarrow 0$ とした場合を考えると、ユニットセルのサイズがマクロ構造に対し限りなく小さくなるということなので、これはマクロ構造物を完全な均質材と仮定することを意味する。その場合の解を $u^0(x)$ と置くと、 $u(x,y)$ はそれにわずかな補正を加えれば得られると考えられる。

- ⑥ そしてその補正量は $\varepsilon$ の関数になっている。

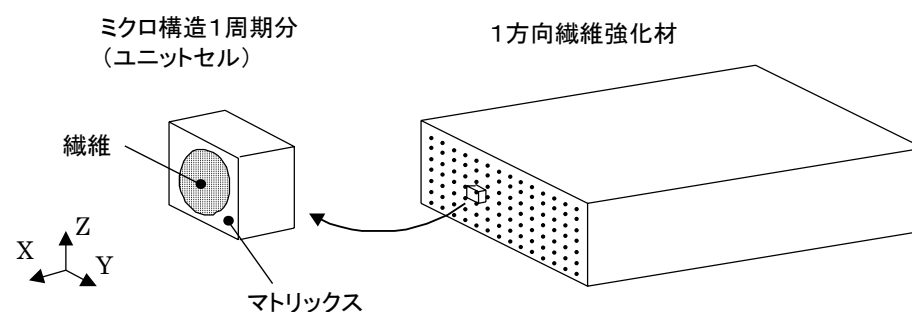


図3-1 均質化法適用例

⑦ ⑤⑥より  $u(x,y)$  を

$$u(x,y) = u^0(x) + \varepsilon u^1(x,y) + \varepsilon^2 u^2(x,y) + \dots \dots \dots (2)$$

という形に漸近展開できると仮定する。これを仮想仕事の原理式に代入して摂動法を適用し、 $\varepsilon$  の 1 次の項まで考慮すると以下⑧⑨⑩のような結論が導かれる。計算はこの手順に従って行われる。

⑧ マクロ構造における均質化物性は以下の式により、ユニットセルから算出される。

$$D_{ijkl}(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left( E_{ijkl}(y) - E_{ijpm}(y) \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_m} \right) dY \dots \dots \dots (3)$$

$D_{ijkl}(x)$  : マクロモデル内の  $x$  における均質化された弾性係数

$|Y|$  : ユニットセル全体の体積

$\int_Y dY$  : ユニットセル全領域での体積積分

$E_{ijkl}(y)$  : ユニットセル内の座標  $y$  における弾性係数

$\chi_p^{kl}$  : ミクロユニットセルを対象として以下の問題を周期境界条件で解いた場合の解

$$\int_Y E_{ijpm}(y) \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_m} \frac{\partial v_i(y)}{\partial y_i} dY = \int_Y E_{ijkl}(y) \frac{\partial v_i(y)}{\partial y_i} dY \dots \dots \dots (4)$$

$v_i(y)$  : 仮想変位

⑨ この均質化された弾性係数を用いて応力解析を行ない、マクロモデルでの変位  $u^0(x)$  が求められる。

⑩ ユニットセル内の変形状態 (変位) は⑧⑨での結果を利用して以下の式から算出される。

$$u(x,y) = u^0(x) + \varepsilon u^1(x,y) = u^0(x) - \varepsilon \chi_k^{ij}(x,y) \frac{\partial u_k^0(x)}{\partial x_i} \dots \dots \dots (5)$$

### 3.3 解析対象

- (1) SiC 被膜付 3 次元織 SiC - C / C 複合材の 40mm 角試験片を解析対象とする。
- (2) SiC 被膜の厚さは 50mm とする。
- (3) 基材の仕様 (以下の記述において基材平面に平行な方向を X, Y とし垂直な方向を Z とする)

① マトリックスは全て C。

② X, Y 繊維束

1 束の構成 :  $\phi 7.5\text{mm}$  SiC 繊維  $\times$  4800 本  
 繊維束の XY 面内におけるピッチ : 約 3mm

③ Z 繊維束

1 束の構成 :  $\phi 6\text{mm}$  C 繊維  $\times$  4000 本

④ 積層数

X 繊維束 : 11 層

Y 繊維束 : 10 層

⑤ 全厚 3.1 ~ 3.2mm

### 3.4 均質化法の解析対象物への適用

3 章の解析では 3.2 で説明した均質化法を、図 3-2 に示すように

- ・ 繊維束部ミクロユニットセル  
 ⇔ 基材部メゾユニットセル

・ 基材部メゾユニットセル ⇔ マクロモデル  
 の 2 段階にわたって適用している。即ち以下のような手順で解析を行なっている。

- (1) 繊維束部ミクロユニットセルモデルを用い、このミクロユニットセルが無数に集まってできている繊維束部の平均的な物性 (= 均質化された物性) を求める。

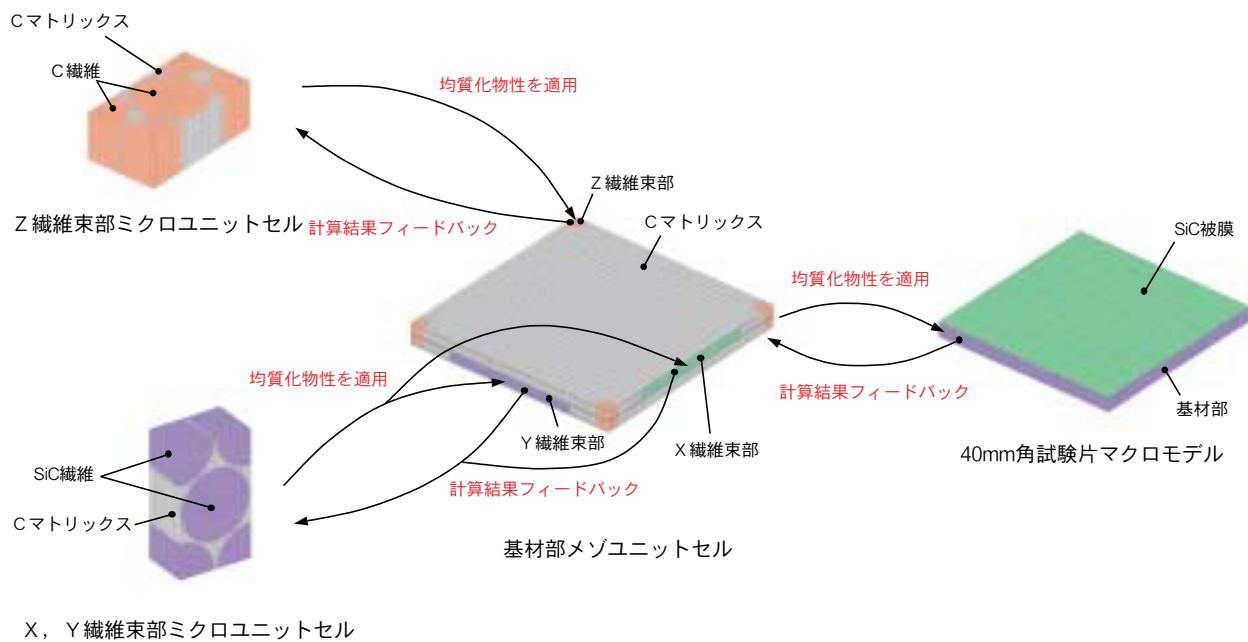


図 3-2 3 章での均質化法の適用



- (2) (1) で求めた繊維束部均質化物性を, 基材部メゾユニットセルモデルの繊維束部に適用し, このメゾユニットセルが無数に集まってできている基材の平均的な物性 (= 均質化された物性) を求める。
- (3) (2) で求めた基材部均質化物性を, マクロモデルの基材部に適用して, 熱応力計算を行ない, マクロモデルでの応力・歪状態を求める。
- (4) マクロモデルでの任意の点の歪状態から, その点に対応する基材部メゾユニットセルモデルでの応力・歪状態を求める。
- (5) 基材部メゾユニットセルモデルでの任意の点の歪状態から, その点に対応する繊維束部マイクロユニットセルモデルでの応力・歪状態を求める。

### 3.5 解析条件及び均質化物性の算出

#### (1) ミクロユニットセル

##### ①モデル図

3.3 (3) の基材の仕様に基づき, ミクロユニットセルとして, SiC 繊維と C マトリックスからなる X, Y 繊維束部に対応するものと, C 繊維と C マトリックスからなる Z 繊維束部に対応するものを 2 種類作成した。

##### (a) X, Y 繊維束部

図3-3にX, Y繊維束部に対応するマイクロユニットセルのモデル図を示す。SiC 繊維の間を C マトリックスが埋める形となっている。X, Y 繊維束部はこのマイクロユ

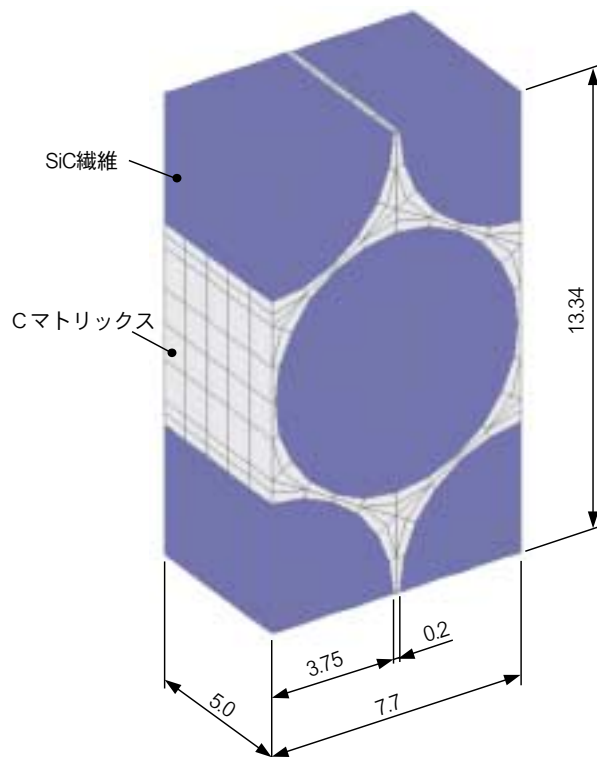


図3-3 ミクロユニットセルモデル図 (X 繊維束部, Y 繊維束部) (単位: mm)

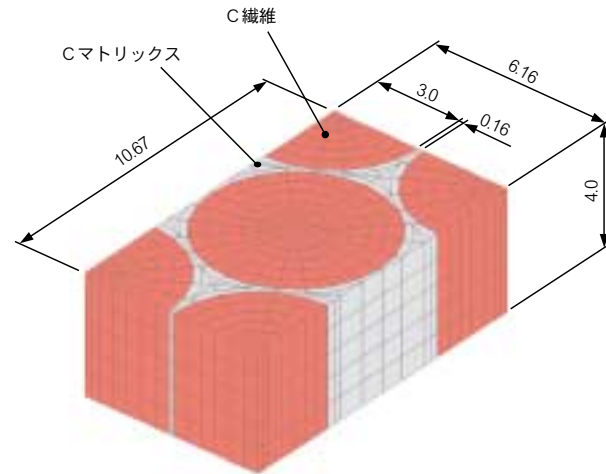


図3-4 ミクロユニットセルモデル図 (Z 繊維束部) (単位: mm)

ットセルが無数に集まって構成される。

##### (b) Z 繊維束部

図3-4にZ繊維束部に対応するマイクロユニットセルのモデル図を示す。C 繊維の間を C マトリックスが埋める形となっている。Z 繊維束部はこのマイクロユニットセルが無数に集まって構成される。

##### ②物性値

マイクロユニットセルで使用している物性値を表3-1に示す。

#### (2) メゾユニットセル

##### ①モデル図

図3-5にメゾユニットセルのモデル図を示す。X, Y, Z 繊維束の間を C マトリックスが埋める形となっている。基材はこのメゾユニットセルが無数に集まって構成される。

モデル各部の寸法は3.3 (3) の基材の仕様に基づき以下のように定めた。

##### (a) メゾユニットセルの外形寸法

X, Y 繊維束の XY 面内におけるピッチは約 3mm であ

表3-1 ミクロユニットセル物性値

SiC 繊維	ヤング率 (GPa)	290
	ポアソン比	0.18
	線膨張係数 ( $\times 10^{-6}$ )	4.3
C 繊維	ヤング率 (GPa)	280
	ポアソン比	0.2
	線膨張係数 ( $\times 10^{-6}$ )	0.95
C マトリックス	ヤング率 (GPa)	3.0
	ポアソン比	0.2
	線膨張係数 ( $\times 10^{-6}$ )	0.95

※ 線膨張係数は 20°C - 1250°C の間の平均値

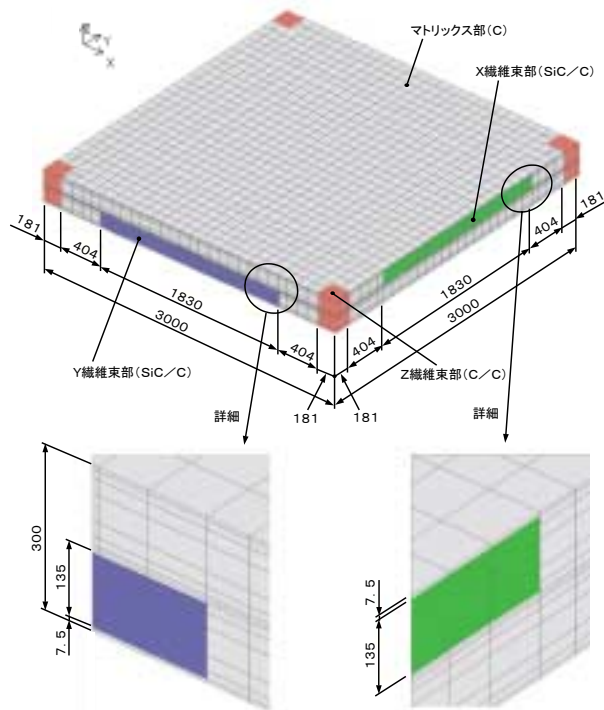


図3-5 メゾユニットセルモデル図 (単位: mm)

ることからXY面内のセルの外形寸法は3mm×3mmとした。

基材の全厚=3.1~3.2mmがX繊維束11層, Y繊維束10層から構成されていることから, 1層の厚さを150μmとし, X, Yあわせて300μmとした。この300μmの厚さには繊維束同士の間を満たすCマトリックスの厚みも含まれている。

(b) X, Y繊維束部の断面寸法

繊維束同士の間には厚さ15μmのCマトリックスがあるとして, 繊維束の厚さは135μmとした。

X, Y繊維束はφ7.5μmのSiC繊維4800本で構成される。またX, Y繊維束部に対応するマイクロユニットセルのV<sub>f</sub>=0.86である。よって繊維束の中をW(μm)として以下のような計算式でWを決めた。

$$\pi \times \left(\frac{7.5}{2}\right)^2 \times 4800 = 135 \times W \times 0.86 \dots\dots\dots(6)$$

$$W=1830 (\mu\text{m})$$

(c) Z繊維束部の断面寸法

Z繊維束はφ6mmのC繊維4000本で構成される。またZ繊維束部に対応するマイクロユニットセルのV<sub>f</sub>=0.86である。よって繊維束の断面を1辺の長さL(mm)の正方形として以下のような計算式でLを決めた。

$$\pi \times \left(\frac{6}{2}\right)^2 \times 4000 = L^2 \times 0.86 \dots\dots\dots(7)$$

$$L=362 (\mu\text{m})$$

モデル図ではこの断面サイズの繊維束がメゾユニットセルの4隅に4つに分割された形で組み込まれている。

表3-2 メゾユニットセル物性値

Cマトリックス	ヤング率 (GPa)	3.0	
	ポアソン比	0.2	
	線膨張係数 (×10 <sup>-6</sup> )	0.95	
X, Y繊維束部 (SiC/C)	E <sub>L</sub> (GPa)	247	
	E <sub>T</sub> (GPa)	36.2	
	G <sub>LT</sub> (GPa)	17.2	
	G <sub>TT</sub> (GPa)	15.0	
	V <sub>LT</sub>	0.027	
	V <sub>TL</sub>	0.18	
	V <sub>TT</sub>	0.21	
	線膨張係数 α <sub>L</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	4.29	
	線膨張係数 α <sub>T</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	3.98	
	Z繊維束部 (C/C)	E <sub>L</sub> (GPa)	239
		E <sub>T</sub> (GPa)	36.0
		G <sub>LT</sub> (GPa)	17.1
		G <sub>TT</sub> (GPa)	14.9
		V <sub>LT</sub>	0.030
V <sub>TL</sub>		0.20	
V <sub>TT</sub>		0.21	
線膨張係数 α <sub>L</sub> (×10 <sup>-6</sup> )		0.950	
線膨張係数 α <sub>T</sub> (×10 <sup>-6</sup> )	0.950		

※1 線膨張係数は20℃-1250℃の間の平均値

②物性値

メゾユニットセルで使用している物性値を表3-2に示す。繊維束部の物性値はマイクロユニットセルから算出された均質化物性を用いる。

(3) マクロモデル

①モデル図

解析対象物の対称性を考慮し, 図3-6のように1/8

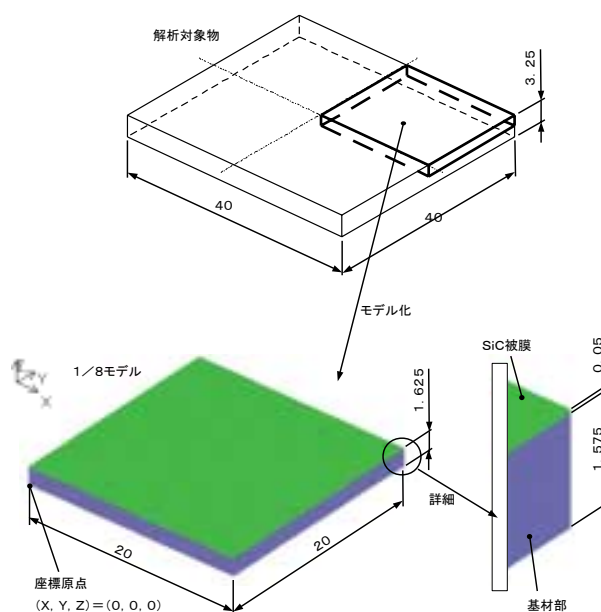


図3-6 マクロモデル図 (単位: mm)

モデルを採用した。拘束条件としては  $X=0$  の面を X 方向拘束,  $Y=0$  の面を Y 方向拘束,  $Z=0$  の面を Z 方向拘束とした。

## ②物性値

物性値を表 3-3 に示す。基材部はメゾユニットセルで計算された均質化物性を用いる。

ここで、この基材部の均質化物性の内、X 方向の線膨張係数  $\alpha_x$  及び Y 方向の線膨張係数  $\alpha_y$  については実測データがあるので比較を行なう。

表 3-3 中の  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  は SiC 繊維, C 繊維, C マトリックスのそれぞれの単体物性から決まり, それらの物性はすべて 20°C-1250°C の平均値を採用しているので,  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  を実測値と比較する場合は実測データの 20°C-1250°C の平均値と比較する必要がある。

基材の X, Y 繊維方向の線膨張係数の実測値を図 3-7 に示す。このグラフに示されている値は以下の式で算出されるので 20°C からその温度までの線膨張係数の平均値を示している。

$$\alpha = \frac{(L_T - L_{20})}{L_{20}(T - 20)} \dots \dots \dots (8)$$

$\alpha$ : 線膨張係数

$T$ : 温度

$L_T$ :  $T^\circ\text{C}$  における長さ

$L_{20}$ : 20°C における長さ

グラフから 20°C-1250°C の線膨張係数の平均値は  $3.78 \times 10^{-6}$  (/°C) で計算値  $4.18 \times 10^{-6}$  (/°C) に近い値となっている。

表 3-3 マクロモデル物性値

SiC 被膜		ヤング率 (GPa)	470
		ポアソン比	0.18
		線膨張係数 ( $\times 10^{-6}$ )	4.3
メゾユニットセルから算出した均質化物性	基材部	$E_x$ (GPa)	77.0
		$E_y$ (GPa)	77.0
		$E_z$ (GPa)	13.5
		$G_{xy}$ (GPa)	6.42
		$G_{yz}$ (GPa)	3.37
		$G_{zx}$ (GPa)	3.37
		$\nu_{xy}$	0.041
		$\nu_{yz}$	0.027
		$\nu_{zx}$	0.041
		$\nu_{yz}$	0.027
		$\nu_{zx}$	0.15
		$\nu_{xy}$	0.15
			線膨張係数 $\alpha_x$ ( $\times 10^{-6}$ )
	線膨張係数 $\alpha_y$ ( $\times 10^{-6}$ )	4.18	
	線膨張係数 $\alpha_z$ ( $\times 10^{-6}$ )	2.31	

※ 1 線膨張係数は 20°C - 1250°C の間の平均値

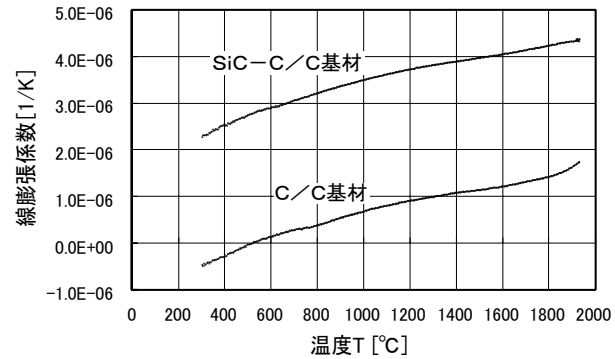


図 3-7 基材の線膨張係数 =  $(L_T - L_{20}) / L_{20} / (T - 20)$  実測値

またグラフから従来の C/C 基材に比べ, SiC-C/C 基材は線膨張係数が SiC 被膜の線膨張係数に近い値となっていることがわかる。これによって SiC 被膜の残留応力は大幅に緩和されることになっている。

## ③荷重条件

以下に示す STEP, 0 - STEP, 5 の履歴に従って計算を行なう。材料内の温度はどの STEP, においても同様であるとする。

- STEP, 0 - 基材が 1600°C で焼成された状態。この状態で基材内部は無応力とする。
- STEP, 1 - 常温 (20°C) に戻った状態。SiC 繊維と C マトリックス, C 繊維の線膨張係数の違いから, 基材内部に残留応力が生じる。
- STEP, 2 - SiC 被膜を蒸着するため, 基材の温度を 1250°C に上げた状態。基材内部の残留応力は緩和され, そこに SiC 被膜が蒸着される。この時点で SiC 被膜の応力は零とする。
- STEP, 3 - 材料全体を常温 (20°C) に冷却した状態。SiC 被膜と基材全体の線膨張係数の違いから SiC 被膜には残留応力が生じ, また基材内部には STEP, 1 における残留応力に加え, 新たな残留応力が加わることになる。
- STEP, 4 - 材料全体の温度を 600°C とする (600°C を選んでいるのは, この温度で SiC 被膜表面の応力の実測値と解析値を比較する為)。
- STEP, 5 - 材料全体の温度を 1700°C とする (1700°C を選んでいるのは, 実験で熱サイクルをかけるときの最高温度が 1700°C である為)。

## 3.6 解析結果と考察

### (1) マクロモデル

マクロモデルの解析結果を以下の通り示す。

図 3-8 解析結果表示に際してのマクロモデル記号説明図

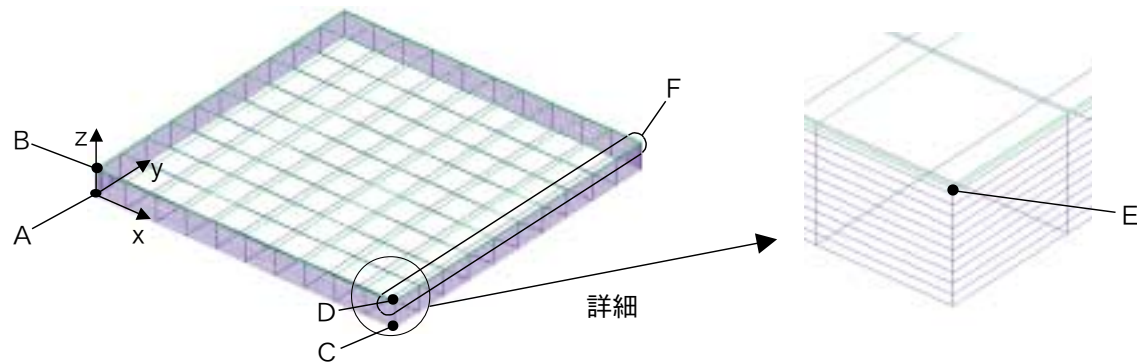


図3-8 解析結果表示に際してのマクロモデル記号説明図

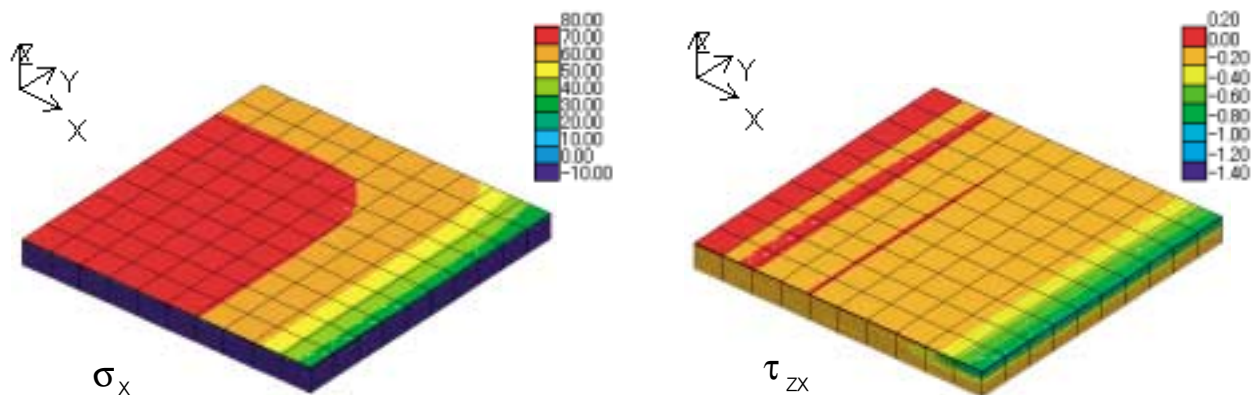
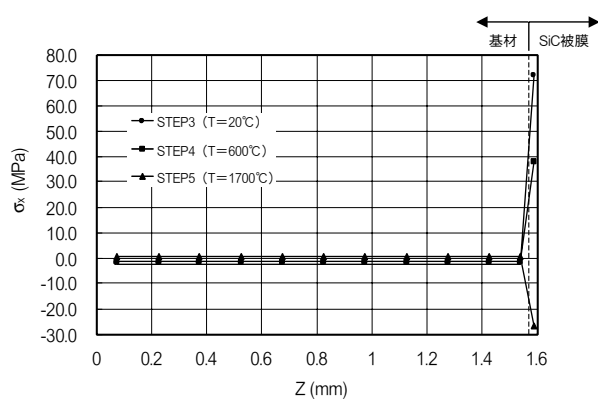
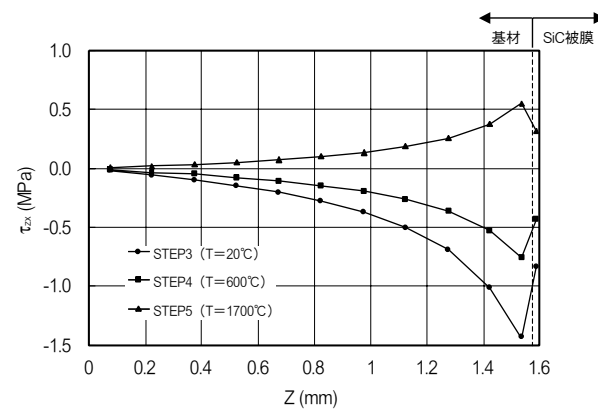
図3-9 STEP3 (20°C) におけるマクロモデルでの  $\sigma_x$ ,  $\tau_{zx}$  の分布 (単位: MPa)図3-10 AB (図3-8) 上の  $\sigma_x$  の分布図3-11 CD (図3-8) 上の  $\tau_{zx}$  の分布

図3-9 STEP, 3 (20°C) におけるマクロモデルでの  $\sigma_x$ ,  $\tau_{zx}$  の分布

図3-10 AB (図3-8) 上の  $\sigma_x$  の分布

図3-11 CD (図3-8) 上の  $\tau_{zx}$  の分布

- ① SiC被膜の引張応力  $\sigma_x$  はSTEP, 3 (20°C) で最大となり、温度が上昇するに従い緩和される。そして成膜時の温度 (1250°C) を超えると、逆に圧縮となる。SiC被膜の引張応力  $\sigma_x$  の最大値 (STEP, 3における値) は試験片の端から充分内側に入ったところで72MPaでSiC被膜の破断強度320MPaに対して充分

小さい値となっている。モデルの対称性から  $\sigma_y$  についても同じ事がいえる。

また図3-12にSiC被膜の20°Cにおける残留応力の実測値を、また表3-4に高速X線応力測定の実験条件を示す。残留応力値は50-60MPaとなっており計算結果とよい一致をみせている。

- ② 層間せん断応力  $\tau_{zx}$  の絶対値は図3-8のF付近で大きくなっている。STEP, 3 (20°C) で最も大きく、温度が上昇するに従い緩和される。その最大値 (STEP, 3における値) は1.44MPaで基材の層間せ

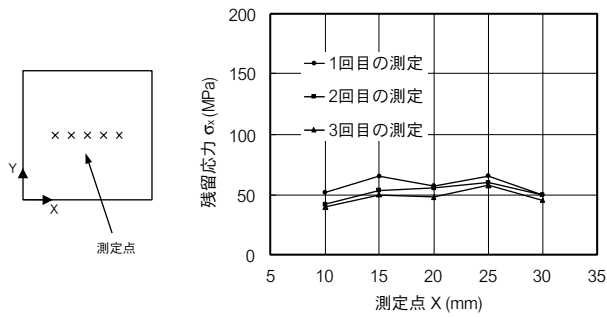


図3-12 SiC 被膜の20°Cにおける残留応力の実測値

表3-4 高速X線応力測定の実験条件

X線光学系	平行ビーム法
測定法	単一入射法
ピークサーチ法	半値巾中点法
X線管球	Fe - $k\alpha$
管電圧	10kV
管電流	6mA
X線入射角	45° 固定
回折角 $2\theta$	151.1°
応力定数	-317MP/deg

ん断強度 20MPa より充分小さい値となっている。  
モデルの対称性から  $\tau_{yz}$  についても同じ事がいえる。

(2) メゾユニットセル

解析結果表示に際してのメゾユニットセル記号説明図を図3-13に示す。マクロモデルのA点、E点(図3-8)の2点について、以下(a)、(b)の通りメゾユニットセルの応力分布を出力した。

① マクロモデルA点でのメゾユニットセルの応力分布

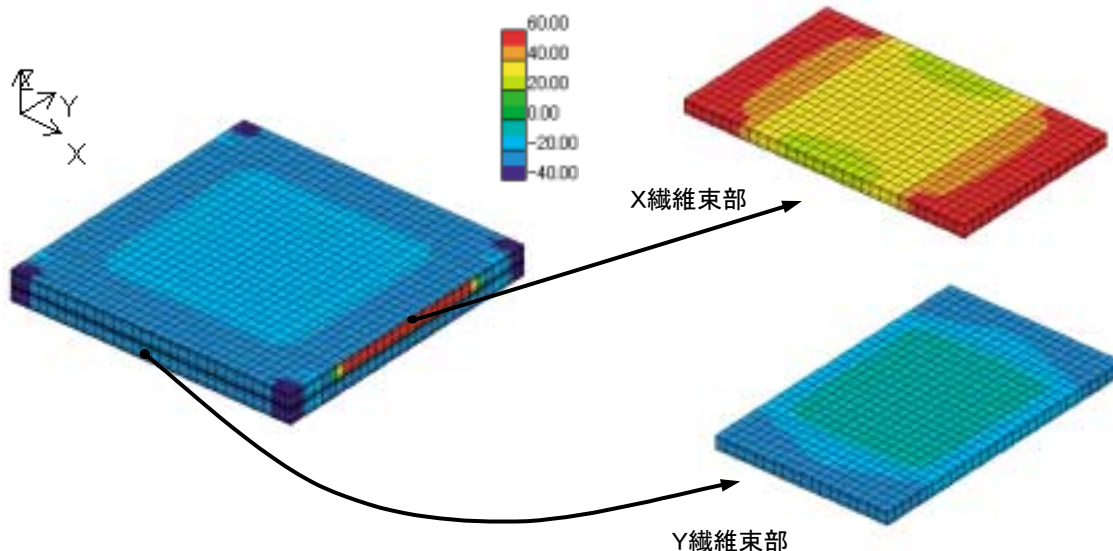


図3-14 マクロモデルA点(図3-8)におけるメゾユニットセルのSTEP3(20°C)での  $\sigma_x$  の分布(単位:MPa)

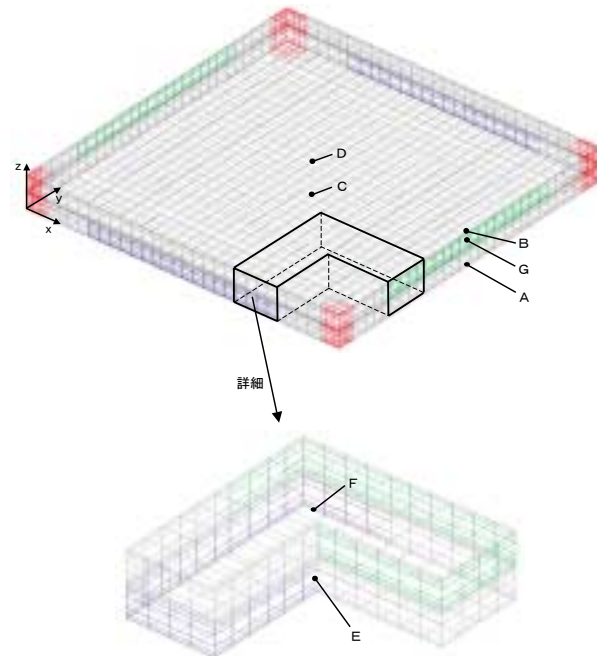


図3-13 解析結果表示に際してのメゾユニットセル記号説明図

マクロモデルで基材中心部にあたるA点(図3-8)におけるメゾユニットセルの応力のうち  $\sigma_x$  に着目し、その分布を以下の通り示す。

図3-14 マクロモデルA点(図3-8)におけるメゾユニットセルのSREP, 3(20°C)での  $\sigma_x$  の分布

図3-15 マクロモデルA点(図3-8)におけるメゾユニットセルAB(図3-13)上の  $\sigma_x$  の分布

図3-16 マクロモデルA点(図3-8)におけるメゾユニットセルCD(図3-13)上の  $\sigma_x$  の分布

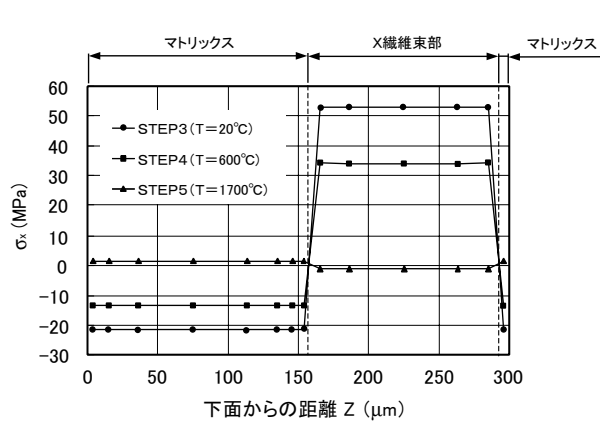


図3-15 マクロモデルA点(図3-8)におけるメゾユニットセルAB(図3-13)上の $\sigma_x$ の分布

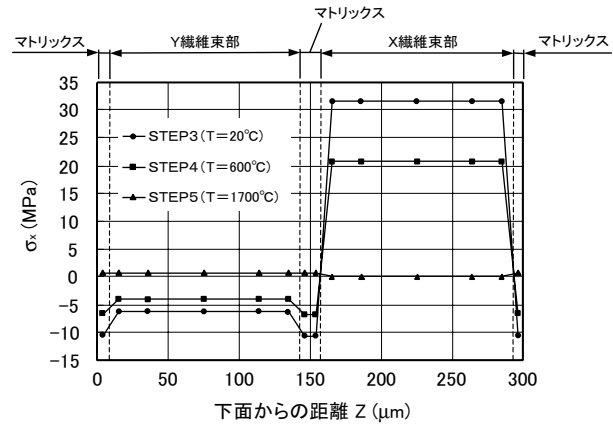


図3-16 マクロモデルA点(図3-8)におけるメゾユニットセルCD(図3-13)上の $\sigma_x$ の分布

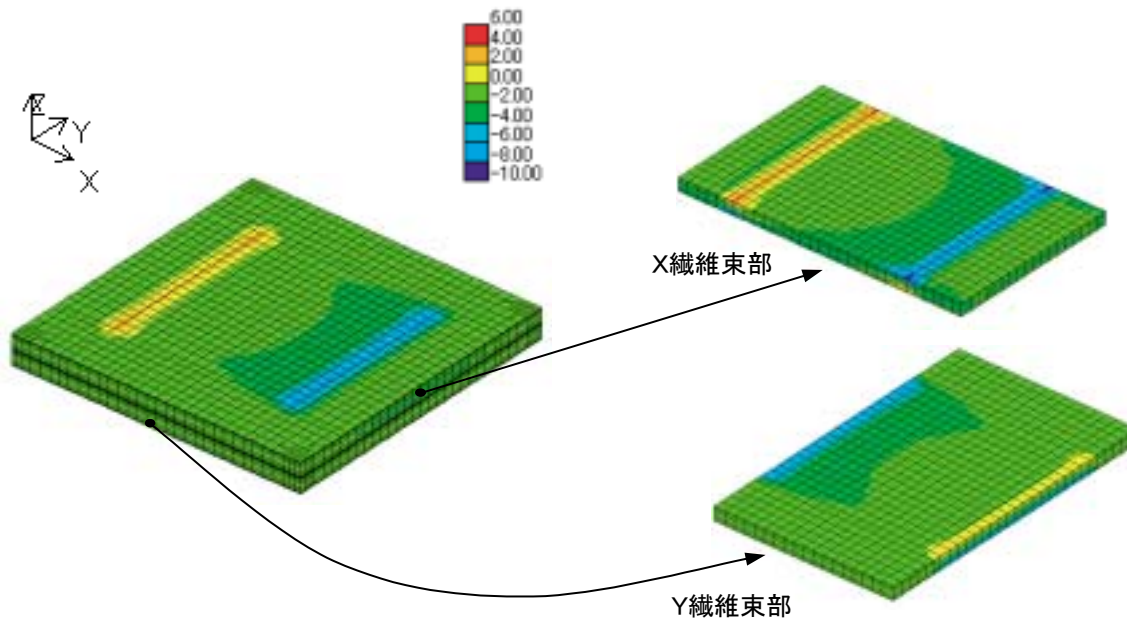


図3-17 マクロモデルE点(図3-8)におけるメゾユニットセルのSTEP3(20°C)での $\tau_{xz}$ の分布(単位:MPa)

$\sigma_x$ はSTEP, 3(20°C)においてX繊維束内で最大となり、その最大値は53MPaになっている。X繊維束内でもY繊維束と交叉するところでは、その値は32MPaに緩和される。この時マトリックス内においてはほぼ全域にわたって10-20MPa程度の圧縮となっている。

② マクロモデルE点でのメゾユニットセルの応力分布  
マクロモデルで層間せん断応力 $\tau_{xz}$ の大きいE点(図3-8)におけるメゾユニットセルの応力のうち $\tau_{xz}$ に着目し、その分布を以下の通り示す。

図3-17 マクロモデルE点(図3-8)におけるメゾユニットセルのSTEP, 3(20°C)での $\tau_{xz}$ の分布

図3-18 マクロモデルE点(図3-8)におけるメゾユニットセルEF(図3-13)上の $\tau_{xz}$ の分布

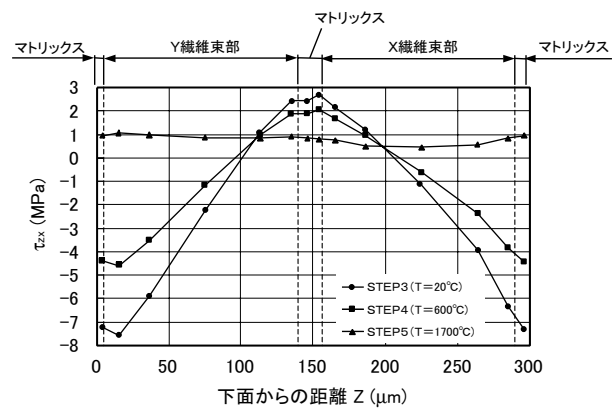


図3-18 マクロモデルE点(図3-8)におけるメゾユニットセルEF(図3-13)上の $\tau_{xz}$ の分布

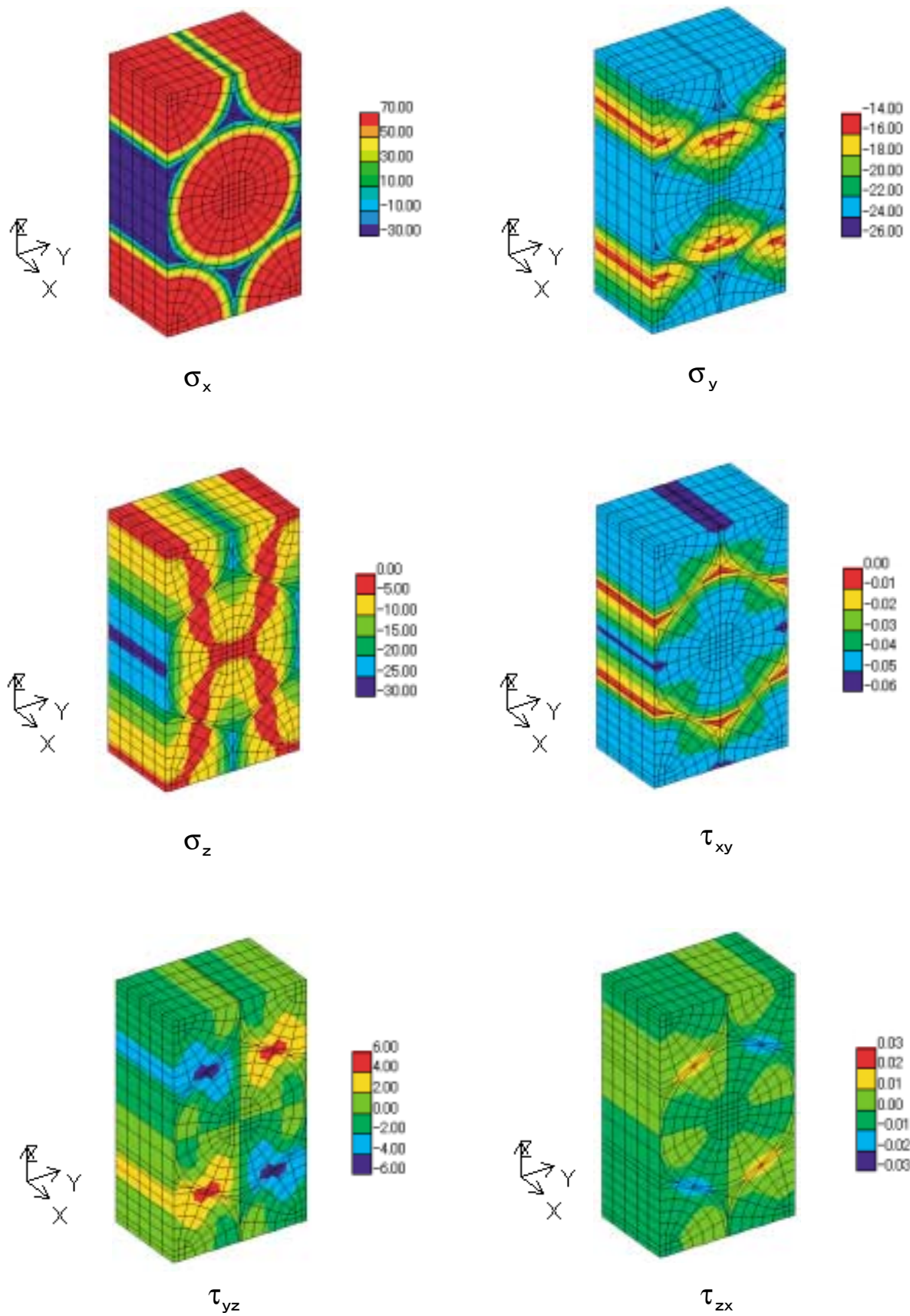


図3-19 メゾユニットセル解析モデルのG点 (図3-13) におけるマイクロユニットセルの応力分布 (単位: MPa)

$\tau_{xz}$ はSTEP, 3 (20°C)においてその絶対値が最大となり, 7.5MPaとなっている(図3-17, 図3-18)。

### (3) ミクロユニットセル

マクロモデルで基材中心部にあたるA点(図3-8)におけるメゾユニットセルの応力分布で,  $\sigma_x$ の値が最も大きいSTEP, 3 (20°C) (図3-14)のG点(図3-13)でのミクロユニットセルの応力分布を図3-19に示す。

- ① 繊維方向の引張応力  $\sigma_x$ はSiC繊維内で最大68MPaとなっている。SiC繊維単体の破断強度2600MPaに対しはるかに小さい値となっている。
- ② マトリックス内の圧縮応力については, xyz3方向共20-30MPaの値となっている。
- ③ せん断応力は3成分とも小さく, また  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$ については±均等に生じている。

## 第4章 まとめ

本解析では, 成膜後のクラック発生のない材料を開発し構造物に適用していく為, 先ず第2章において, SiC被膜付C/C基材の試験片を対象として成膜後の常温における残留応力の解析を行ない, 応力状態の把握を行なった。その結果SiC被膜表面における最大主応力はSiCの破断強度をはるかに越える値であることがわかった。またミクロ・マクロ両モデルでの解析結果を比較したところ, ミクロモデルでは応力分布にC/C基材の繊維方向の影響が顕著に現れ, マクロモデルでは解析できない詳細な応力分布が得られる事が分かった。また, 熱サイクル負荷時のSiC膜の割れが拡大する位置の予測について数値計算の有効性が確認された。

第3章では, 40mm角試験片でクラック発生防止の実現できた3次元織SiC-C/C基材を一般構造物に適用していくことを目指し, マクロ・ミクロ両レベルの解析が同時にできる均質化法をコード化して解析を行なった。そして基材の線膨張係数やSiC被膜の残留応力の実測データと計算結果を比較したところ, よい一致をみせ手法の妥当性が確認された。また, この手法により基材内部の応力状態をマクロモデル・ミクロモデルで解析を行った結果, 繊維1本1本にかかる引張応力や, 層間のせん断応力はいずれも基材強度に比べはるかに小さい値

であることが分かった。

今後, 翼前縁部のような一般構造物の解析や, 新基材の開発にこの手法を適用していくと共に, 計算結果と実測値との比較も行ないその有効性を確認していきたい。

## 参考文献

- (1) 炭素繊維の応用技術, 株式会社シーエムシー
- (2) 日本複合材料学会編, 複合材料ハンドブック, (1989), 日刊工業新聞社.
- (3) 林毅, 複合材料工学, (1971), 日科技連
- (4) Keller, J.B. and Keigelman, S., Asymptotic solutions of initial value problems for nonlinear partial differential equations, SIAM J. Appl. Math., 18 (1970), 748-758.
- (5) Bensoussan, A., Lions, J.L. and Papanicolaou, G., Asymptotic Analysis for Periodic Structures, (1978), North Holland, Amsterdam.
- (6) Sanchez-Palencia, E., Non-homogeneous Media and Vibration Theory, Lecture Note in Physics, No.127 (1980), Berlin, Springer.
- (7) Bakhvalov, N. and Panasenko, G., Homogenization : Averaging Processes in Periodic Media, (1984), Kluwer Academic Pub.
- (8) Guedes, J.M. and Kikuchi, N., Preprocessing and Postprocessing for Materials Based on the Homogenization Method with Adaptive Finite Element Methods, Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 83 (1990), 143-198.
- (9) 寺田賢二郎, 弓削康平, 菊池昇, 均質化法を用いた複合材料の弾塑性解析(第一報, 定式化)日本機械学会論文集 61-590, A編 (1995), 2199-2205.
- (10) 寺田賢二郎, 弓削康平, 菊池昇, 均質化法を用いた複合材料の弾塑性解析(第二報, 数値解析)日本機械学会論文集 62-601, A編 (1996), 2072-2079.
- (11) 江島晋, 弓削康平, 均質化法による樹脂複合材料の遮音効果解析, 日本機械学会論文集 63-605, A編 (1997), 102-109.