

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	セラミックス基複合材料の損傷問題への制約条件付き有限要素モデルの適用
--------	------------------------------------

氏 名	喜多村 竜太
-----	--------

セラミックスは耐熱性、耐摩耗性、耐食性などに優れた特性を持つが、靱性や強度信頼性の低さが問題視されている。一方、SiC 繊維強化 SiC セラミックスを始めとするセラミックス基繊維強化複合材料 (CMC ; Ceramic Matrix Composites) は、繊維状のセラミックスを母材セラミックスに複合化させ、繊維の架橋、破断、引抜け、界面はく離、き裂偏向などの機構によってき裂の不安定伝ばを阻止し高靱化を実現した損傷許容型のセラミックスである。このような特性から、CMC は従来の金属材料などでは適用が困難な航空宇宙分野などの高温環境下構造材料として期待されており、その静的および繰返し負荷下における力学的挙動を明らかにすることは当該分野の工学的意義を高めることになる。

ところで、有限要素解析ソフトによる接触問題では、ペナルティ法や拡大ラグランジュ法などの解析アルゴリズムが用いられている。これらは、接触面間の剛性を接触バネで表現し、すべり量および食込み量が許容量以下となるように繰返し計算を必要とするため、計算時間が長く、精度も許容量に依存する。一方、本研究で提案する制約条件付き有限要素モデルは、CMC 損傷後の界面における各節点変位の等価性や接触力のつり合いを仮定し、これを制約条件として数値解を求めるものである。本モデルを利用すれば、先に述べた繰返し計算を必要とすることなく、わずか一回の計算で全体剛性方程式から変位解が得られる。また、マトリックスき裂や繊維破断が複数箇所に生成した場合にも、解の発散現象を防ぐことが可能になると期待されている。

さて、接触問題におけるクーロン摩擦は、CMC 内の繊維またはマトリックスに圧縮負荷が加わる時、両者に接着関係がないとしても繊維-マトリックス界面に常に生じる。一方、引張負荷が与えられると、半径方向の圧縮残留応力が解放された時点で両者の接触は無くなり、界面摩擦による力学的相互干渉は生じない。しかし、繊維-マトリックス間に接着関係が存在すれば、両者は接触した状態が続くであろうし、接着強度以上の負荷があれば、はく離後の繊維-マトリックス間の界面状態いかに界面すべり抵抗の発生も予想される。したがって、制約条件付き有限要素モデルをより広範に適用する上で、クーロン摩擦以外にも適用できる定式化を行なう必要がある。

そこで、本研究では CMC の界面はく離後に界面摩擦として (i) 圧縮負荷下でクーロン摩擦が生じる場合および (ii) 引張負荷下で一定の界面すべり抵抗が働く場合に対して有限要素モデルの定式化を行い、これを既存の汎用有限要素解析ソフト ANSYS および過去に提案された理論モデルと比較検討し、本手法の有効性について議論した。また、(iii) 界面損傷後の力学的挙動を扱う代表的な有限要素である、結合力要素についても本モデルによる定式化を図った。

その結果、制約条件付き有限要素モデルにおいて、(i) 圧縮負荷下でクーロン摩擦が生じる場合、界面固着領域においてマトリックスおよび繊維軸応力はともに一定になることが確認された。界面はく離領域では、マトリックス軸応力はマトリックスき裂面から非線形的な応力回復を示し、繊維軸応力はマトリックスき裂面で最大値をとることが確認された。また、界面はく離先端近傍の力学的挙動において、繊維及びマトリックスの急激な応力変化を確認することができた。一方、半径および円周方向応力は、界面固着領域においてともにゼロになることが確認された。また、界面はく離領域では、応力はともに非線形を示し、繊維およびマトリックスの半径方向に圧縮応力が働くことも確認した。以上の力学挙動は、従来からの界面はく離をとともなう CMC の損傷メカニズムと合致するものである。さらに、以上の本モデルによる数値解を汎用有限要素解析ソフト (ANSYS) による数値解および理論モデルによる解析解と比較したところ、すべて定量的にほぼ一致することが判明した。また、本モデルによる解析は ANSYS と比較し、繰返し計算数および計算時間が少なく、計算コストの面で優れていることが確認できた。

一方、制約条件付き有限要素モデルにおいて(ii) 引張負荷下で一定の界面すべり抵抗が働く場合 (界面せん断応力を一定とする)、界面はく離領域において繊維およびマトリックスの応力分布は線形的に変化し、この場合も理論モデルによる解析解と定量的にほぼ一致することが判明した。また、結合力要素を取り入れた制約条件付き有限要素モデルについても数値解を取得し、応力分布が結合力の変化に対応して首尾よく現れることを確認した。以上の結果から、制約条件付き有限要素モデルは複数のマトリックスき裂やき裂偏向が生じる場合など、理論モデルや汎用有限要素解析ソフトでは再現が困難な状況下での活用が期待できる。

## 【論文審査結果の要旨】

SiC 繊維強化 SiC セラミックスを始めとするセラミックス基繊維強化複合材料 (Ceramic Matrix Composites, CMC と略記する) は、繊維状のセラミックスを母材セラミックスに複合化させ、繊維の架橋、破断、引抜け、界面はく離、き裂偏向などの機構によってき裂の不安定伝ばを阻止し高靱化を実現した損傷許容型のセラミックスである。このような特性から、CMC は従来の金属材料などでは適用が困難な航空宇宙分野などの高温環境下構造材料として期待されている。

ところで、有限要素解析ソフトによる接触問題では、ペナルティ法や拡大ラグランジュ法などの解析アルゴリズムが用いられている。これらは、接触面間の剛性を接触バネで表現し、すべり量および食込み量が許容量以下となるように繰返し計算を必要とするため、解の精度は許容量に依存する。一方、制約条件付き有限要素法は、接触面における各節点変位の等価性や接触力のつり合いなどを仮定し、これを制約条件として繰返し計算することなく解を求めるものであり、その有効利用が期待されている。

本研究は、以上の背景から CMC の実際に起こりうる損傷状態を取り上げ、制約条件付き有限要素法に基づいて損傷状態を表現する全体剛性方程式の定式化手法を提案している。そして、得られた数値解を従来の理論解および汎用有限要素解析ソフトによる数値解と比較し、その有効性を検討している。

内容は、まず緒言 (第 1 章) で本研究の必要性を述べた上で、以下のように要約されている。

1. CMC の界面はく離後に界面摩擦として (i) 圧縮負荷下でクーロン摩擦が生じる場合および (ii) 引張負荷下で一定の界面すべり抵抗が働く場合に対して制約条件付き有限要素法の適用性を図っている。具体的には、繊維-マトリックス要素間に 4 重節点を導入することで種々の界面の損傷状態を表現するとともに、制約条件がその損傷状態を満たすように与え全体剛性方程式の定式化を図っている (第 2 章)。

2. 第 2 章で提案した定式化に基づき、CMC の界面はく離後の応力解析を行なうとともに、得られた結果を従来の理論モデルによる解、および汎用有限要素解析ソフト ANSYS による数値解と比較している。提案手法に基づいた軸方向および半径方向等の応力分布はどちらの解にも定量的にほぼ一致することを見出し、本モデルの有効性を実証している (第 3 章)。

3. 制約条件付き有限要素モデルの応用として、界面における (i) 結合力要素および (ii) 摩擦固着現象にも本手法の適用を試みている。得られた応力分布およびヒステリシスループは、実際に生じる挙動を定性的に

説明できることを明らかにしている（第4章）.

4. 以上の総括を行なっている（第5章）.

以上のように、本研究は制約条件付き有限要素法を CMC の種々の界面損傷問題に適用し、汎用ソフトでは表現できない物理現象を含んだ数値解析手法として新たに発展させるとともに、その有効性を従来の理論モデルおよび汎用ソフトとの比較から実証している。以上から、独創性および工学的価値の高い内容であると判断できる。また、この概念を種々の複合材料損傷、たとえば Off-axis すべり、トランスバースクラック、あるいは繊維破断との相互干渉等の諸問題へ拡張することで、今後の当該分野の発展に大いに貢献できるものと判断される。

本審査会では、予備審査会で指摘された不十分な箇所の訂正、追加を行うとともに、質問事項に対する明確な回答があった。また、公聴会における主要な質問内容は、繰返し下の摩擦係数の変化に対する物理的本質性やヒステリシスループに及ぼす熱応力の影響、界面はく離のエネルギー基準等に関するものであったが、いずれの質問に対しても的確な回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、発展性、工学的価値ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。