

数値解析を用いた接着接合体の設計技術

春名一志*
原賀康介**

1. ま え が き

接着接合法は、ボルト、ナット、リベットなどの機械的締結法に比べ、軽量化・高剛性化・低コスト化などが図れることから、電子部品から航空宇宙分野まで、あらゆる産業分野で非常に重要な接合法となってきた。今後、より大きな負荷を受け持つ重要な部位に適用されていく可能性が高い。しかしながら、接着部の強度設計方法が明確でないため、信頼性の確保が難しく、大負荷部位への適用が困難である。接着接合法の適用拡大には、接着接合部を対象とした合理的な強度設計技術の確立が必要である。

接着接合体の強度設計は、通常の機器設計と同様に、要求される形状に対して求めた接着部の応力分布に、候補材料(被着体と接着剤)の接着強度特性を考慮した破壊則(Failure Criterion)を適用し、破壊強度を予測することによって行う。一般に応力計算は、単純形状に対する解析解から有限要素法(Finite Element Method: FEM)に代表される数値解析手法まで、様々な方法を用いて行うことができる。中でも FEM は、その高い汎用性と最近のプリ/ポストプロセッサの進歩により、複雑な三次元形状物に対して比較的容易に応力計算が行える方法である。接着接合体に対しても FEM は適用可能であるが、複雑三次元形状物を対象とした場合には、接着層が極薄であることに起因する計算量の膨大化により、計算不能となる場合が多い。そのため、計算量の低減と精度の確保を両立させた擬三次元モデル(Quasi-Three Dimensional Model)を開発した。

また、通常接着接合体に対して線形応力解析を行った場合、応力特異性(Stress Singularity)により、接着界面端部の応力値が無窮大となる場合が多い⁽¹⁾⁽²⁾。そのため、最大応

力説を始めとする、有限の応力値を必要とする材料力学的破壊則が適用できない。これに対してこの研究では、特異性の影響を受けない Point Stress Criterion⁽³⁾を採用した強度予測手法を提案し、実測値との比較によってその妥当性を評価した。

本稿では、擬三次元モデルの開発及び破壊則として Point Stress Criterion を適用して行った強度予測について述べる。

2. 擬三次元モデルによる応力解析技術

2.1 課 題

図1に示す Single-lap 接着継手 (ASTM D-1002 に準拠) を例に、通常の三次元 FEM 解析を行う場合の課題について述べる。図2に、三次元形状物に対して一般に用いられる 8 節点ソリッド要素でモデル化した場合の要素分割例を示す。

接着接合体を対象とした場合、要素分割を非常に詳細にする必要があり、図1に示すような単純な試験片に対しても、全要素数が 4,000 と多くなる。ソリッド要素モデルの要素数が多くなり計算量が膨大化する原因を以下に示す。図3に接着端近傍の応力分布を模式的に示したが、接着端においては、応力特異性を伴った著しい応力集中を示す。接着部の破

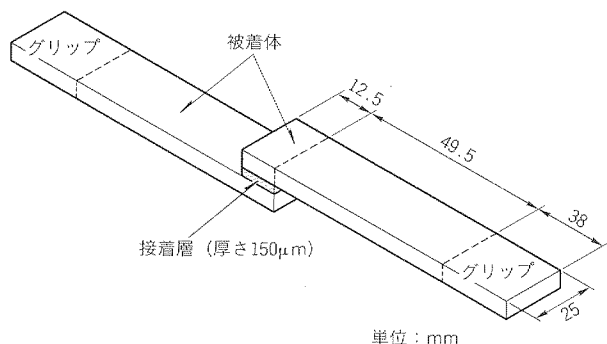


図1. Single-lap接着継手の形状(ASTM D-1002)

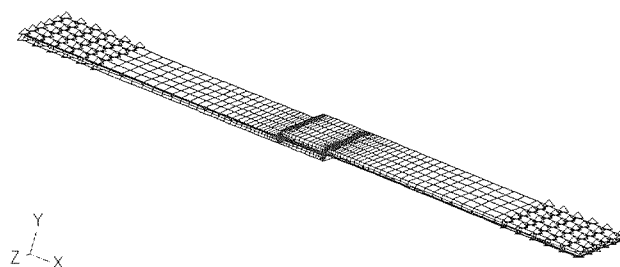


図2. ソリッド要素によるモデル化

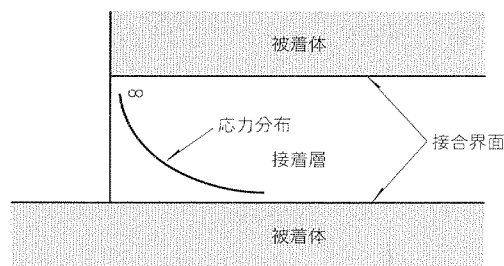


図3. 接着端近傍の応力場

場は、接着端の応力集中に支配され、特異場近傍の応力状態を正確に求める必要があるため、詳細な要素分割が必要である。また、極薄の接着層が存在するため、接着層厚さが要素の基準寸法となり、要素縦横比を極端に大きくできないことから、面積方向の分割数も多くなる。さらに、FEMの場合、その計算量は全自由度数の二乗にほぼ比例するが⁽⁴⁾、表1に示すようにソリッド要素の場合、自由度の数自体が多い。


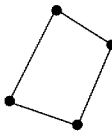
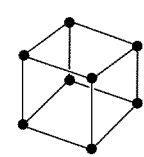
以上の理由から、複雑形状三次元接着接合体を対象とした場合、計算量が膨大となり、計算不能を招く。計算量を低減するためには、要素分割数と使用要素の次元を低減し、かつ十分な精度を確保した有限要素モデルの開発が必要である。

2.2 擬三次元モデル

この研究では、FEMによる応力解析において、精度の確保と計算量の低減を両立させた擬三次元モデルを開発した。

図4に、擬三次元モデルを適用した接着接合体のモデル化の概要を示す。被着体は、平面応力 (Plane Stress) 状態を仮定することによってシェル要素でモデル化する。ソリッド要素に比べ、次元を低減でき、さらに厚さ方向の分割が不要

表1 主要要素の自由度

要素種類	全節点数	全自由度 N	N^2
 ビーム要素	2	6	36
 シェル要素	4	12	144
 ソリッド要素	8	24	576

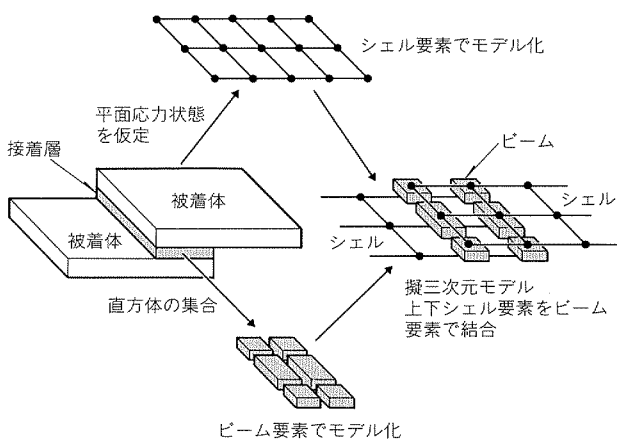


図4. 擬三次元モデルにおけるモデル化の概要

であるため、要素分割数を低減できる。接着層は、直方体の集合であることとらえることにより、一次元のビーム要素でモデル化する。一次元であることから要素の縦横比を考慮する必要がなく、被着体シェル要素間に配置して、荷重の伝達を行うことができる。

以上のように、擬三次元モデルは、シェル要素とビーム要素を組み合わせ、擬似的に三次元形状接着接合体を表現できる。

図5に、擬三次元モデルのシェル要素とビーム要素の結合部近傍を詳細に示す。シェル要素は、被着体の中立面上に位置するため、上下シェル要素の節点間を直接ビーム要素で結合すると、ビーム要素の長さが接着層の膜厚よりも長くなり、剛性が確保できない。ビーム要素の長さを接着層厚と一致させるため、このモデルでは、ビーム要素に被着体板厚 $1/2$ 分のオフセットを持たせた後、剛体リンクした。また、図6に、接着部のビーム要素の配置とその断面形状を模式的に示す。ビーム要素と結合するシェル要素の形状に従って断面形状を変化させ、その断面積の和を接着面積に一致させた。また、各断面の形状に伴い、式(1)で求められる断面二次モーメント I を、それぞれのビーム要素に与えた。

$$I = bh^3 / 12 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 b :ビーム断面の幅、 h :ビーム断面の高さである。

図7に、ビーム要素から得られる主な出力を示す。接着部の応力状態を評価する場合、せん断応力と接着層厚さ方向の引張応力を求める必要があるが⁽⁵⁾、擬三次元モデルでは、ビーム要素のせん断力 V_x 及び軸力 F_x をビーム断面積で除し

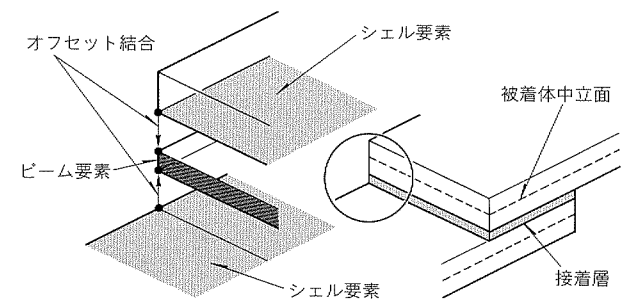


図5. シェル要素とビーム要素の結合部分

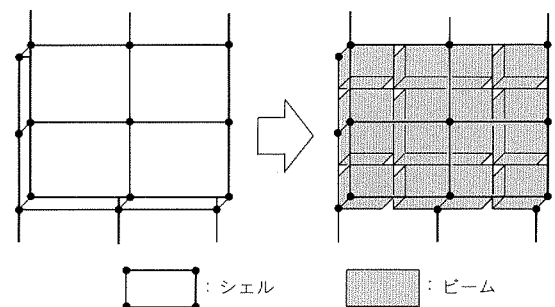


図6. ラップ部のビーム要素とその断面形状

た応力値によってそれぞれ評価する。

2.3 擬三次元モデルの精度と計算量

一般に FEM 解析で用いられる平面ひずみモデルとソリッド要素モデルの解析結果との比較により、擬三次元モデルの精度を計算した。平面ひずみモデル、擬三次元モデルに用いた要素分割図及び解析プログラム、計算機をそれぞれ図 8、表 2 に示す。また、各モデルで計算した変形図を図 9 に示す。Single-lap 継手の場合、荷重軸の不一致により、せん断力だけでなく曲げモーメントが生じる。各モデルとも曲げモー

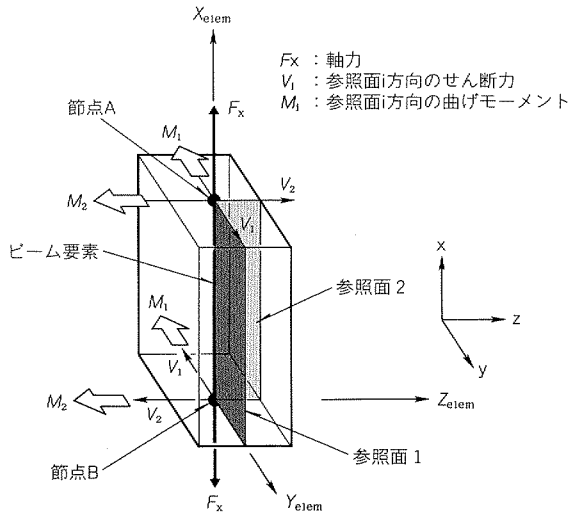
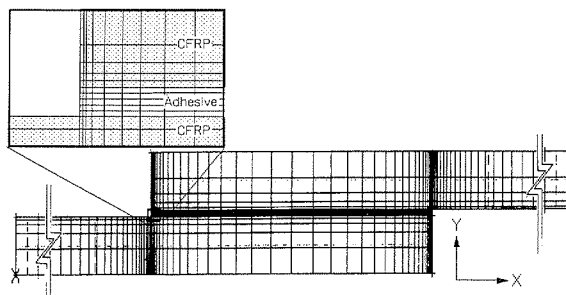
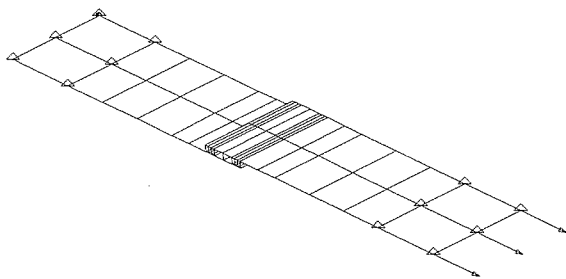


図 7. ビーム要素の主な出力



(a) 平面ひずみモデル



(b) 擬三次元モデル

図 8. 平面ひずみモデル、擬三次元モデルの要素分割図

表 2 使用した解析プログラムと計算機

解析プログラム	MSC/NASTRAN
計算機	CRAY Y-MP

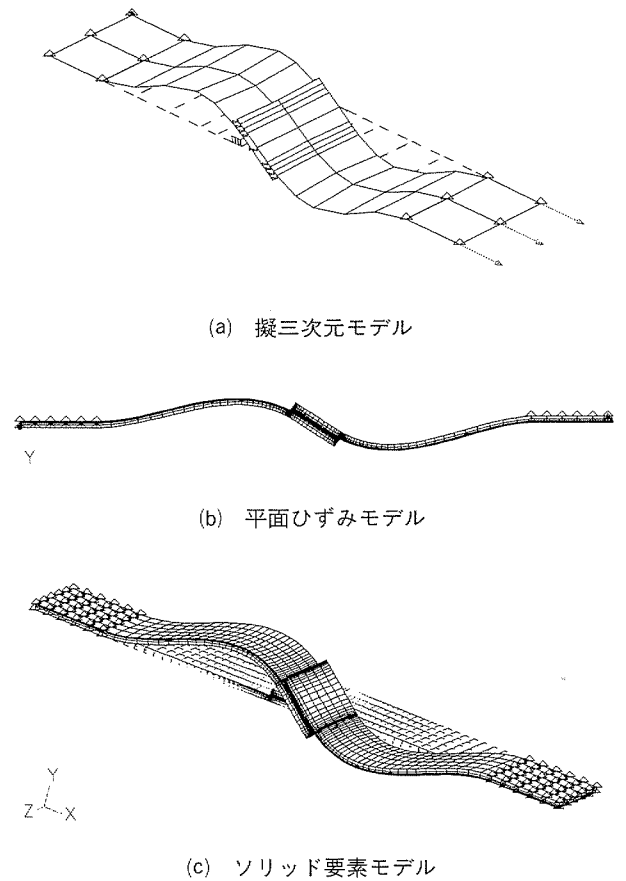
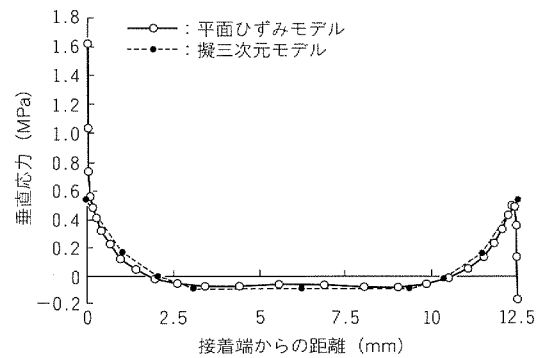
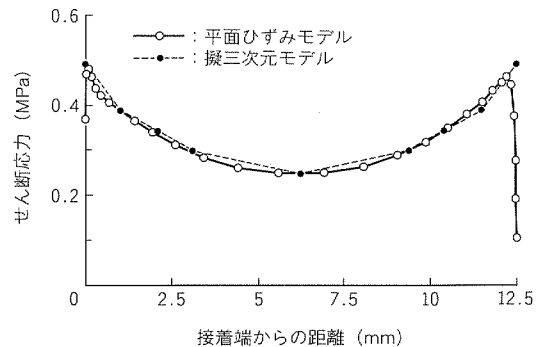


図 9. 各モデルの解析結果例(変形図)



(a) 垂直応力



(b) せん断応力

図 10. 応力解析結果(0.1kN負荷時の接着層応力分布)

メントによる曲げ変形をよく表している。接着継手の強度評価において重要な接着層の応力分布は、前述のように、ビーム要素の V_x と F_x から求めることができる。

図10に擬三次元モデルを用いて求めた接着層の応力分布を示す。図中には、平面ひずみモデルで詳細に求めた応力分布も示す (Single-lap 継手に関しては平面ひずみ状態が仮定できるため、平面ひずみモデルで高精度な解を得ることができる)。通常接着層の応力は端部に著しい応力集中を示すため、従来モデルでは、図8(a)に示したように、非常に詳細な要素分割を要する。それに対して擬三次元モデルでは、比較的粗い要素分割にもかかわらず、平面ひずみモデルで詳細に求めた応力分布と一致する結果が得られ、十分な精度を確保できる。

次に、表2に示したプログラムと計算機で解析を行った際の、計算時間の比較を図11に示す。前述のように十分な解析精度を持っているにもかかわらず、ソリッド要素モデルに対して約1/100以上の計算量低減を実現した。この計算量の低減により、実際の複雑三次元形状接着接合体を対象とした場合においても、計算量の膨大化を防ぎ、高精度な応力解析を可能とした。

3. 強度予測

3.1 方法

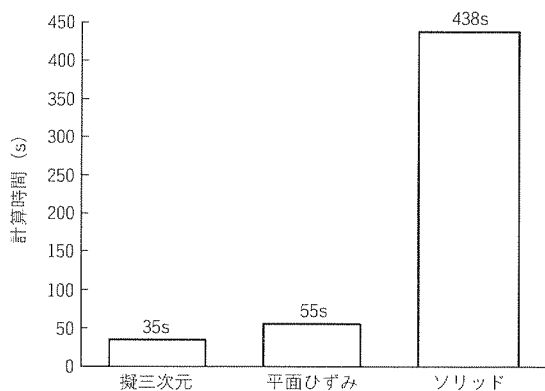


図11. 各有限要素モデルと計算量の比較

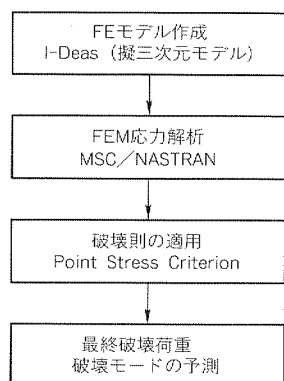


図12. 強度予測手法のフローチャート

図12に、強度予測までの解析フローを示す。FEM応力解析によって求めた接着層の応力分布に対し、この手法では、Point Stress Criterionを適用した(図13)。この破壊則は、円孔部の引張応力集中場に対して提案されているものであるが⁽³⁾、接着部に対しては、特性長さ上の応力値が接着強度を超えた時、最終破壊が生じるとする。最終破壊を対象とする場合、それまでに発生する微小な破壊により、端部の応力集中は分散、再分布を繰り返す。そのため、端部の応力値ではなく、端部よりも内側の特性長さ上の応力値によって破壊を評価するのがこの破壊則の考え方である。特性長さ上の応力値すなわちラップ内部の応力に注目するため、応力特異性の影響を受けない。

また、図10に示した擬三次元モデル解析では、接着端極近傍の応力が算出できていないが、最終破壊の評価に必要な特性長さ上の応力値は精度良く求めることができる。

3.2 予測結果

ここで、2種の Single-lap 接着継手(図14)に対する強度予測例を示す。Type A, B 両試験片は、Single-lap タイ

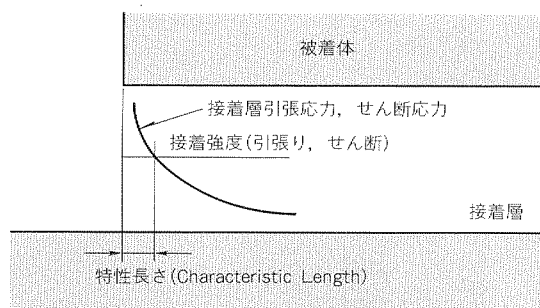
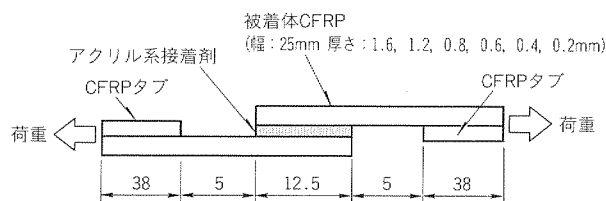
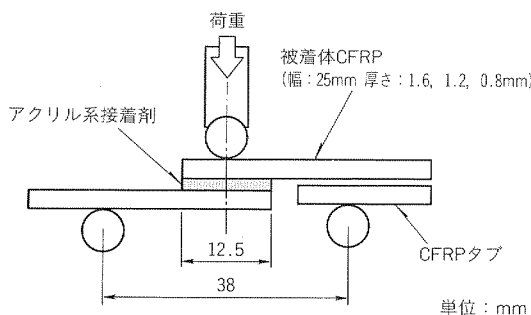


図13. 接着継手に対するPoint Stress Criterionの適用

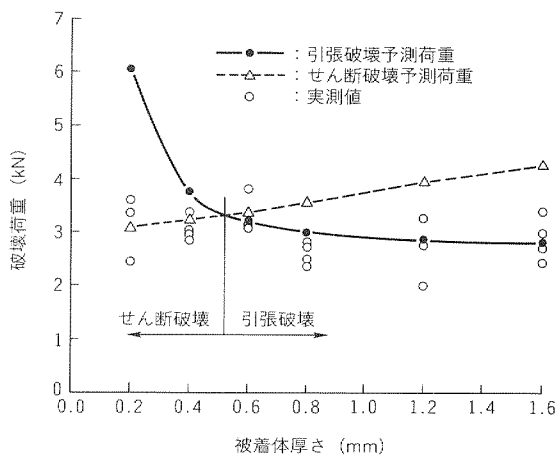


(a) Type A

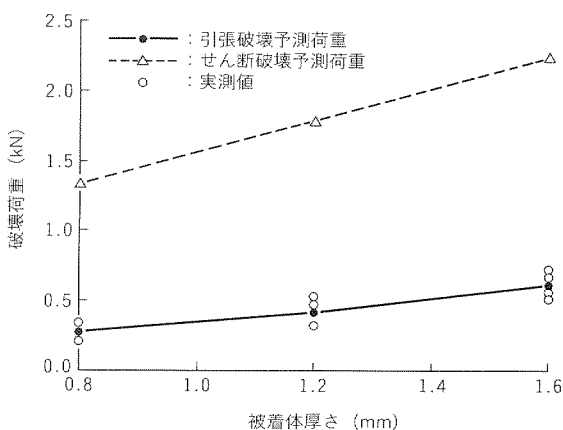


(b) Type B

図14. 解析対象試験片形状



(a) Type A



(b) Type B

図15. 強度予測結果

プの接着継手であり、それぞれ引張荷重及び曲げ荷重下での破壊試験片とした。また、形状パラメータとして、被着体厚さを変化させ、荷重条件と幾何学的条件を変化させた。

図15に、被着体厚さに対する最終破壊荷重の予測結果を示した。図には引張及びせん断で破壊する場合の予測荷重を示したが、解析による予測荷重は、それらのうち低い方の荷重となる。また、解析上破壊に寄与した応力成分と破壊モードが対応する。図中には実測値も示したが、予測値と実測値

はよい一致を示しており、Point Stress Criterionの有効性を確認できる。FEMをベースとした数値解析によって、接着部の最終破壊荷重の予測を実現した。

4. むすび

本稿では、接着接合部の設計に必要な応力解析技術及び強度予測技術について示した。応力解析に関しては、実際の複雑三次元形状接着接合体を対象とした場合の計算量膨大化が課題であったが、擬三次元モデルによるFEM応力解析技術を開発することによって解決した。このモデルでは、十分な精度を確保し、一般に用いられるソリッド要素モデルに対して約1/100以上の計算量低減を実現した。

また、引張荷重及び曲げ荷重を受ける接着継手に対して強度予測を行い、接着部の最終破壊荷重を高精度に予測できることを示した。これにより、信頼性の高い接着接合部の強度設計ができ、接着接合をより大きな負荷を受け持つ重要な部位へ適用することが可能であると考えられる。

参考文献

- (1) Hein, V.L., Erdogan, F.: Stress Singularity in a Two Materials Wedge, *Int. J. Fract. Mech.*, **147**, No.3, 317~329 (1971)
- (2) Bogy, D.B., J.: Two-Edge Bonded Elastic Wedges of Different Materials and Wedge Angles under Surface Transactions, *Appl. Mech.*, **38**, 317~386 (1971)
- (3) Whitney, J.M., Nuismer, R.J.: Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations, *J. Composite Materials*, **8**, 253~265 (1974)
- (4) 日本エムエスシー(株), MSC/NASTRAN 入門マニュアル, 1~10 (1993)
- (5) 春名一志, 濱田泰以, 前川善一郎: CFRP 薄板接着継手の力学的挙動に関する研究, *日本機械学会論文集 A*, **60**, No.577, 98~103 (1994)