

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 14 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820015

研究課題名(和文) マイクロスケール特異要素FEMによる非線形材料接合体の界面はく離強度の解明

研究課題名(英文) Investigation of Interfacial Delamination Force of Nonlinear Material Joints Based on FEM Using Micro-scale Singular Element

研究代表者

倉橋 貴彦 (Kurahashi, Takahiko)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00467945

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、天然ゴムをSS400により挟んだ継手構造の接合体に対する引張はく離試験を行い、接着部分の長さとはく離荷重の関係を整理した。SS400-天然ゴム接着接合体の解析モデルを作成し、幾何学的非線形効果を考慮した応力解析を行った。結果として、はく離荷重時には、接着長さに依らず、SS400-接着剤界面端近傍において応力成分は1.8～2.0MPa程度の値を示すことがわかった。また、特異要素を用いた応力解析による検討は、線形弾性体による接合構造を対象とし、アルミニウム接着接合試験片の界面上における平均はく離応力と接着層の幅・厚さを使った無次元特異応力場の強さに関する関係を整理した。

研究成果の概要(英文)：In this study, tensile delamination test was carried out for the specimen of the bonded structure consists of natural rubber and SS400, and we investigated the relationship between the adhesion length and delamination force. We generate the finite element mesh for the SS400-natural rubber bonded model, and carried out the stress analysis considering the non-linear effect, i.e., the Green-Lagrange strain. Consequently, we found that the stress component at interface edge between SS400 and resin is approximately 1.8 - 2.0MPa, even if the adhesive length is changed. In addition, the stress analysis using singular element is carried out for bonded structures consists of linear elastic body. We investigated the accuracy of results of stress analysis in case of the singular element, and the relationship between the interfacial average delamination stress and the non-dimensional intensity of stress singularity.

研究分野：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：シミュレーション工学 材料力学 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

異材接合体の接合界面端近傍における特異応力場に関する研究は従来から様々行われている。特異応力場の領域は、対象とする材料の幅が広くなればなる程大きくなり、材料の組み合わせによっては、特異応力場の強さの変化は界面の幅と関係付けられることが明らかになっている。一般に線形弾性体では解析精度を考えると、境界要素法を用いることにより応力解析を行うことが好ましい。しかし、非線形弾性体の場合、基本解を求めることが困難であることから、一般に有限要素法が適用される。境界要素法に比べ有限要素法では物体内部のメッシュを作成する必要があり、境界要素法を適用する場合に比べ、有限要素法を適用する場合はより多くの計算コストが必要とされる。また、特異点近傍においては、特異応力場における応力分布を適切に表わすために、対象となる異材接合体のサイズに対して特異場近傍におけるメッシュサイズは限りなく小さくする必要がある。このような観点から、特異点周りのメッシュのみ応力特異性を考慮した補間関数を使用する方法が Akin により提案されている。この補間関数を使用した場合は、理論的にひずみ  $\epsilon_{ij}$ 、応力  $\sigma_{ij}$  とともに特異点からの距離  $r$  に対して特異性のオーダーを  $\lambda$  とすると  $\epsilon_{ij} \propto r^\lambda$ 、 $\sigma_{ij} \propto r^{\lambda-1}$  となることが証明されている。そこで、本研究では、天然ゴム-SS400 接着接合体に対して、引張りはく離試験を行い、各接着長さに対するはく離荷重を整理し、各接着長さに対するモデルの有限要素メッシュを作成し、応力解析により非線形弾性体の接合構造の界面端近傍における応力場に関する検討を実施する。また、特異要素は設定する領域の大きさによっても解析精度が異なることから、特異要素による解析精度に関する検証も行う。

2. 研究の目的

異材接合体の界面上におけるはく離荷重と臨界特異応力場の強さの関係は近年明らかになってきている。従来、対象としている材料は線形の弾性体に対する接合体のため、ひずみ成分に非線形項を含むグリーンのひずみを使用した応力解析を行う。また、応力特異性を含む材料変形の解析では、特異要素を使用することで解析精度の向上を見込むことができる。そこで、本研究では、特異要素が応力解析の解析精度に与える影響を考察し、その後、線形弾性体のはく離試験結果と無次元化した特異応力場の強さの関係について考察を行う。

3. 研究の方法

ゴム接合体に対する引張りはく離試験と有限要素法に基づく応力解析を行う。

3. 1 引張りはく離試験

引張りはく離試験は図 1 に示す形状の継手モデルに対して行い、接着している部分の長さ

を Case1 : 30mm, Case2 : 45mm, Case3 : 60mm として試験を行う。実際の引張試験の様子を図 2 に示す。また、図 1 に示すモデルに対して幾何学的非線形効果を考慮した応力解析を実施する。

引張りはく離試験は図 1 に示す形状の継手モデルに対して行い、接着している部分の長さを Case1 : 30mm, Case2 : 45mm, Case3 : 60mm として試験を行う。実際の引張試験の様子を図 2 に示す。

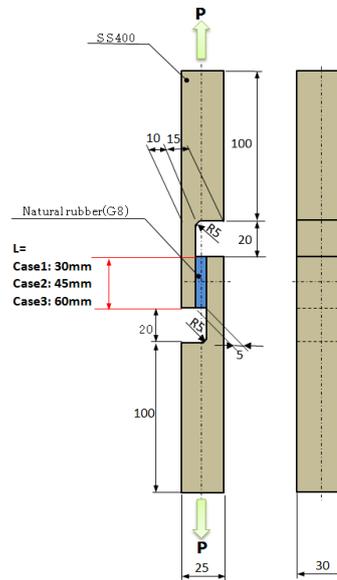


Fig. 1 Model of tensile delamination test

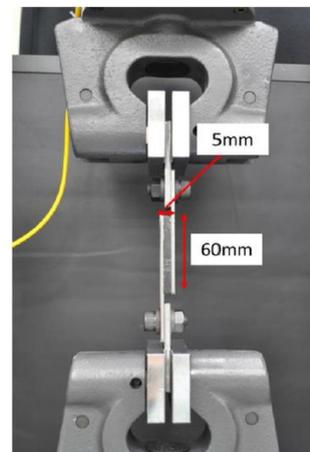


Fig. 2 Photo of actual experiment

3. 2 有限要素法に基づく接合材料の応力解析の精度向上を目指した特異要素の使用

有限要素法における補間関数は形状関数と各節点における状態量により表される。三角形 1 次要素による形状関数であれば式(1)のように表される。  $N_1 \sim N_3$  は形状関数を示しており、  $\xi, \eta$  は面積座標を示している。形状関数は総和が 1 となるため、 Akin は特異点周りの要素についてのみ、特異性を表す形状関数を適用し、また形状関数の総和が 1 となる

ように式(2)の形状関数を提案した。式(2)における関数  $R$  は式(3)に示すように定義されており、 $\xi$ - $\eta$  座標系の原点が特異点となるように式を定めている。式(3)において $\lambda$ は特異性のオーダを示している。

$$\begin{cases} N_1 = 1 - \xi - \eta \\ N_2 = \xi \\ N_3 = \eta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} SN_1 = 1 - \frac{1 - N_1(\xi, \eta)}{R(\xi, \eta)} \\ SN_2 = \frac{N_2(\xi, \eta)}{R(\xi, \eta)} \\ SN_3 = \frac{N_3(\xi, \eta)}{R(\xi, \eta)} \end{cases} \quad (2)$$

$$R(\xi, \eta) = (1 - N_1)^\lambda = (\xi + \eta)^\lambda \quad (3)$$

ここで、Akin 特異要素における形状関数  $SN_1 \sim SN_3$  について  $x, y$  の微分を計算すると式(4)のように表される。

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial SN_i}{\partial x} \\ \frac{\partial SN_i}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{Bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial SN_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial SN_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

右辺のベクトルを具体的に計算すると式(5)、(6)のように表される。特異点周りの要素における形状関数の微分値は式(5)により表し、それ以外の要素では、通常の要素に対する形状関数の微分値を適用することになる(図3)。ここで、通常の三角形一次要素に対する形状関数と、Akin 特異要素に対する形状関数をコンター図で表すと2次元、3次元モデルの場合においてそれぞれ図4、5のようになる。図4においてAkin 特異要素に対する形状関数の計算時は $\lambda$ を0.45と設定しており、図5においては、 $\lambda$ を0.50と設定している。本検討では、特異要素の効果を検証した後に、はく離時における荷重と特異応力場の強さに関する考察を行なう。

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial SN_1}{\partial \xi} \\ \frac{\partial SN_2}{\partial \xi} \\ \frac{\partial SN_3}{\partial \xi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (1 - \lambda) \frac{\partial N_1}{\partial \xi} (1 - N_1)^{-\lambda} \\ \frac{\partial N_2}{\partial \xi} (1 - N_1)^{-\lambda} + \lambda \frac{\partial N_1}{\partial \xi} N_2 (1 - N_1)^{-(1+\lambda)} \\ \frac{\partial N_3}{\partial \xi} (1 - N_1)^{-\lambda} + \lambda \frac{\partial N_1}{\partial \xi} N_3 (1 - N_1)^{-(1+\lambda)} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial SN_1}{\partial \eta} \\ \frac{\partial SN_2}{\partial \eta} \\ \frac{\partial SN_3}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (1 - \lambda) \frac{\partial N_1}{\partial \eta} (1 - N_1)^{-\lambda} \\ \frac{\partial N_2}{\partial \eta} (1 - N_1)^{-\lambda} + \lambda \frac{\partial N_1}{\partial \eta} N_2 (1 - N_1)^{-(1+\lambda)} \\ \frac{\partial N_3}{\partial \eta} (1 - N_1)^{-\lambda} + \lambda \frac{\partial N_1}{\partial \eta} N_3 (1 - N_1)^{-(1+\lambda)} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

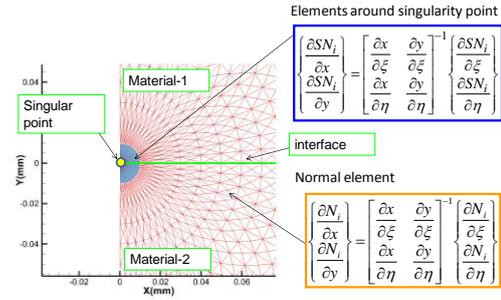


Fig. 3 Singular and normal element

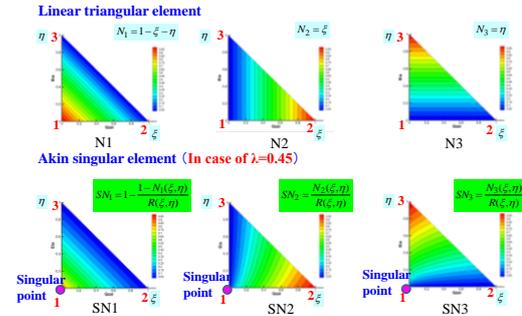


Fig.4 Distribution of shape function in 2D model

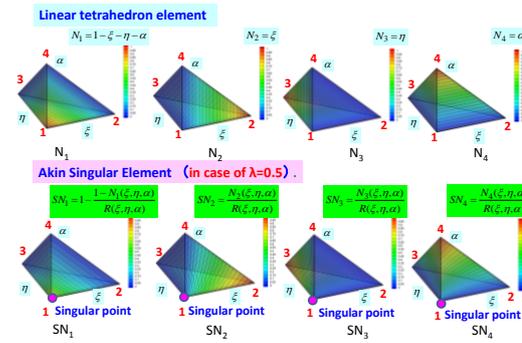


Fig. 5 Distribution of shape function in 3D model

#### 4. 研究成果

以下の成果報告では、天然ゴム-SS400 接着接合体に対する検討を中心に整理し、特異要素に関する検討は、雑誌論文・研究発表の概要等を参照して頂くことにする。

##### 4. 1 はく離試験結果

まず、引張はく離試験の結果を示す。実験においては、接着幅を 30mm, 45mm, 60mm と変え、各試験片に対して5 ケースのはく離試験を行っている。図6～図8 は引張試験時における荷重と変位の関係を示している。図6, 7, 8 はそれぞれ接着幅が 30mm, 45mm, 60mm の場合の結果を示す。荷重が不連続に低下している部分のはく離が生じたことを意味しており、はく離荷重は接着幅に応じて大きくなっていることがわかる。各荷重についてピークの値をはく離荷重として、各接着幅の試験片において整理した結果を図9に示す。図は誤差バーを使用して示しており、図中の点は平均値を示す。はく離荷重の平均値は、接着幅の増加に伴い単調に増加していることがわかる。また、各試験片に対してはく離荷重を接着面積で除した平均はく離応力と接

着幅の関係を図 10 に示す。結果として、結果にばらつきはあるが、どの試験片もはく離応力の平均値である 0.6MPa 近傍ではく離していることがわかる。

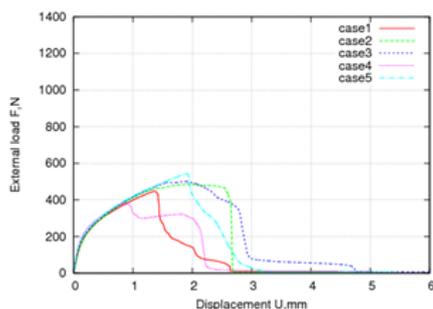


Fig. 6 Relationship between external force and displacement (Adhesive width = 30mm)

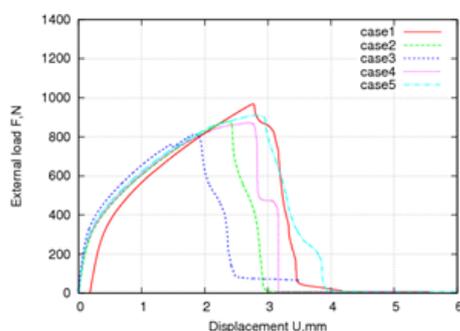


Fig. 7 Relationship between external force and displacement (Adhesive width = 45mm)

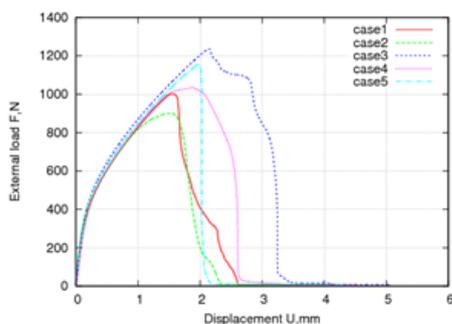


Fig. 8 Relationship between external force and displacement (Adhesive width = 60mm)

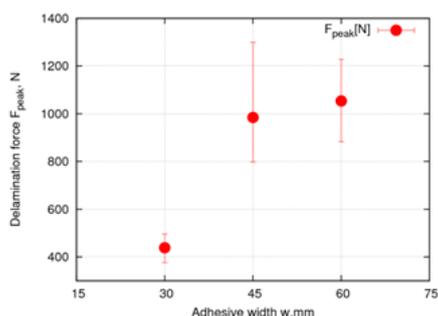


Fig. 9 Variation of delamination force with respect to adhesive width

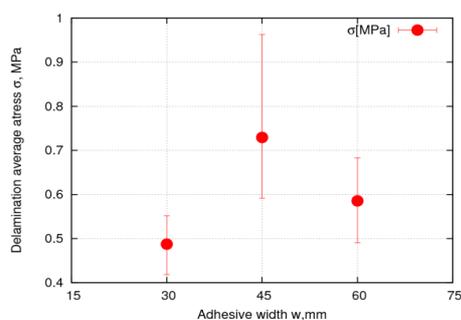
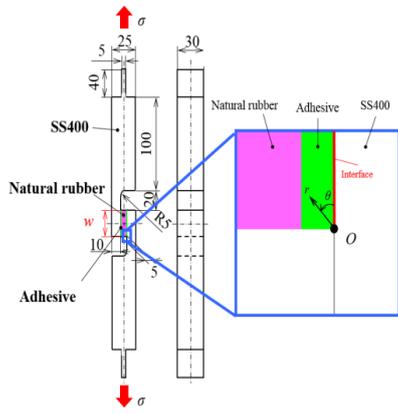


Fig. 10 Variation of average delamination stress with respect to adhesive width

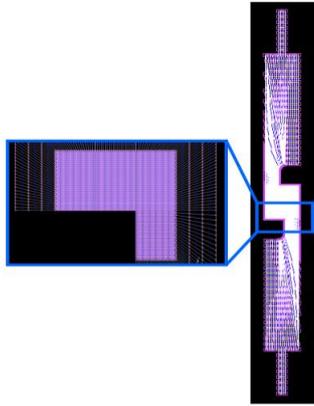
#### 4. 2 応力解析による検討

図 1 に示す解析モデルを作成し、接着幅  $w$  を 30~60mm の間を 5mm ずつ変え、荷重増分  $\Delta\sigma$  は 0.1MPa とし、10 ステップ( $\Delta\sigma \times 10 = 0.1 \times 10 = 1\text{MPa}$ )で、図 11(a)に示すメッシュを用いて計算を行った。各材料定数は表 1 に示す。図 11(b)に接着剤と SS400 の界面端近傍の拡大図を示し、図 12 に応力成分  $\sigma_{\theta\theta}$  の分布を示す。図 12 より、接着幅が大きくなるにつれて応力成分  $\sigma_{\theta\theta}$  が小さくなっていることがわかり、接着幅が増大するにつれてはく離が生じにくくなるものと考えられる。また、図 13 に接着幅に対する界面端における応力成分  $\sigma_{\theta\theta}$  の分布を示す。本検討では、表 1 に示す天然ゴムのヤング率の値を倍と半分にした場合について結果を整理した。結果として、図 13 より、天然ゴムのヤング率を変更した全てのケースにおいて、接着幅が大きくなるにつれて、界面端における応力成分  $\sigma_{\theta\theta}$  の減少勾配が緩やかになることがわかった。また、天然ゴムのヤング率を変えた場合において、接着幅  $w$  が 30mm の場合は界面端における応力成分  $\sigma_{\theta\theta}$  の値は変わらないが、天然ゴムのヤング率が小さくなると、接着幅  $w$  が長くなるにつれて界面端における応力成分  $\sigma_{\theta\theta}$  の減少勾配がさらに緩やかになる（接着幅を長くしても界面端における応力成分  $\sigma_{\theta\theta}$  の値は小さくなりにくい）ことがわかった。さらに、接着幅  $w$  が 30mm より短くなると、天然ゴムのヤング率が小さいほど界面端における応力成分  $\sigma_{\theta\theta}$  の値は小さくなることがわかった。

また、図 10 に示すはく離荷重の最大値、最小値、平均値をつかみ部の断面積により除して部材軸方向に対する引張り応力として入力し、応力解析を行った結果を図 14 に示す。結果として、はく離時においては、接着幅が 30, 45, 60mm のモデルにおいて、界面端近傍における応力成分  $\sigma_{\theta\theta}$  の値は 1.8~2.0MPa 近傍を示しており、はく離時において界面端近傍における応力成分  $\sigma_{\theta\theta}$  の値は同程度の値を示すものと考えられる。



(a) Target model



(b) Finite element mesh

Fig.11 Computational model

Table 1 Material properties

	$E$ , GPa	$\nu$
SS400	205	0.3000
Natural rubber	0.00351	0.4999
Adhesive	3.9	0.3700

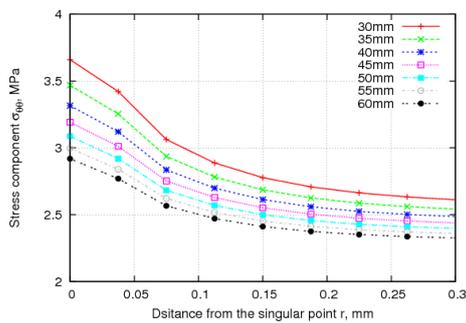


Fig. 12 Variation of delamination force with respect to adhesive width

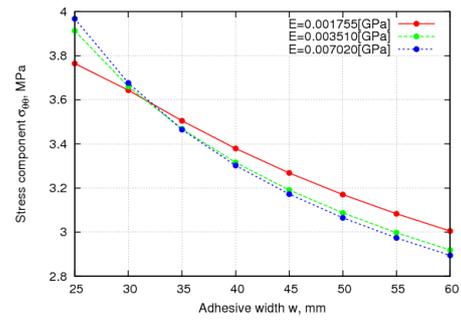


Fig. 13 Variation of delamination force with respect to adhesive width

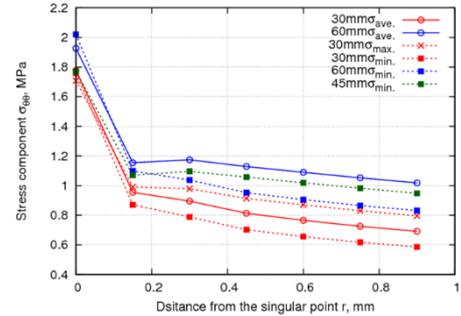


Fig. 14 Variation of delamination force with respect to adhesive width

#### 4. 3 研究により得られた知見の整理

本研究により得られた知見を以下に整理する。

- ・接着長さを変えた天然ゴムと SS400 の接合試験片に対する引張破断試験を行った結果、はく離荷重を接着断面積により除した応力を計算した結果、本研究では 0.6MPa 近傍の値を示すことを確認した。

- ・幾何学的非線形効果（グリーン・ラグランジュひずみ）を考慮した天然ゴムと SS400 の接合試験片に対する応力解析では、はく離荷重（最大値・最小値・平均値）と等価となる境界条件を入力し解析を行った結果、接着長さの違いに関わらず、界面端近傍における  $\sigma_{\theta\theta}$  の値は概ね 1.8~2.0MPa を示すことを確認した。

本報告書の 4. 2 節に示した応力解析においても、特異要素の使用が望まれるが、特異要素は線形弾性体の理論により構築されたものであり、幾何学的非線形効果を考慮した材料への直接的な適用は困難なものとなる。そのため、本研究では、特異要素を使用しない場合でも問題がないレベルまで、界面端近傍におけるメッシュは細かくすることで応力解析を行った。また、SS400-天然ゴム接着接合体のはく離荷重の評価については、メッシュを細かくすることで、界面端点近傍の応力値は増大することから界面端点の応力値そのもので評価することは好ましくない。今

後は、エネルギーによる幾何学的非線形材料の接合体のはく離評価法について更なる考察を行う予定である。

#### 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)

[雑誌論文] (計3件)

(1) 倉橋 貴彦, 渡辺 裕太郎, 近藤 俊美, 古口 日出男, 三次元特異性オーダを用いた Akin 特異要素による異材接合体の界面端角部近傍における特異応力場の評価 (四面体要素と特異要素使用時の結果の比較), 日本機械学会論文集, 第 80 巻, 第 809 号 pp.1-18, 2014.

(2) Y.Watanabe, T.Kurahashi, T.Kondo and H.Koguchi, Influence of Akin singular element for intensity of stress singularity near interface edge of three dimensional dissimilar material joints, Fourth International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS 2014), pp.1-4, 2014 年(Proceedings).

(3) 倉橋貴彦, 大島知士, 伊部和貴, 渡邊裕太郎, 近藤俊美, 古口日出男, 板状接合試験片に対するはく離時の界面平均応力と無次元特異応力場の強さの関係に関する考察 (特異要素を用いた FEM による応力解析), 材料学会誌, 2015(In press).

[学会発表] (計13件)

(1) Yutaro Watanabe, Takahiko Kurahashi, Toshimi Kondo, Analysis of Singularity Field near Interface Edge of Bonded Structures Based on FEM Using Akin Singular Element, U.S.National Congress of Computational Mechanics, 2013 年 7 月.

(2) 倉橋 貴彦, 渡辺 裕太郎, 近藤 俊美, AKIN 特異要素を用いた有限要素法による異材接合体の界面端近傍に対する特異場の評価, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集, OS0103, 2013 年 10 月.

(3) 渡辺 裕太郎, 倉橋 貴彦, 近藤 俊美, 古口 日出男, Akin の特異要素を用いた FEM による異材接合体に対する三次元特異応力場の評価, 日本機械学会北陸信越学生会 第 43 回学生員卒業研究発表講演会, 0305, pp.1-2, 2014 年 3 月.

(4) T.Kurahashi, Y.Watanabe, T.Kondo and H.Koguchi, Effect of Akin singular element for stress singular field of three dimensional bonded structures, 3rd. International GIGAKU Conference in Nagaoka (IGCN), 2014 年 6 月.

(5) T.Kurahashi, Y.Watanabe, T.Kondo and H.Koguchi, Study on effect of three dimensional Akin singular element for stress analysis of dissimilar material joints, 11th WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS (WCCM 2014), Proceedings, pp.1-12, 2014 年 7 月.

(6) 倉橋 貴彦, 近藤 俊美, 古口 日出男, 数

値シミュレーションによる異材接合体の特異応力場の強さの算定, 日本機械学会 2014 年度年次大会, ワークショップ 機械材料・材料加工部門企画 締結・接合のプロセスと接合部・界面の信頼性評価, pp.1-6, 2014 年 9 月.(招待講演)

(7) T.Kurahashi, S.Oshima, K.Ibe, Y.Watanabe, T.Kondo and H.Koguchi Study on Relationship between Average Delamination Stress on Interface and Non-dimensional intensity of Stress Singularity for Bonded Strips, The Fourth Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures (ACMFMS2014), pp.1-4, 2014 年 10 月.

(8) Y.Watanabe, T.Kurahashi, T.Kondo and H.Koguchi, Influence of Akin singular element for intensity of stress singularity near interface edge of three dimensional dissimilar material joints, Fourth International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS 2014), pp.1-4, 2014 年 11 月.

(9) 倉橋 貴彦, 大島 知士, 伊部 和貴, 渡邊裕太郎, 近藤 俊美, 古口 日出男, 無次元特異応力場の強さを用いた板状接合試験片に対する界面上の平均はく離応力の推定, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp.1-3, 2014 年 11 月.

(10) 渡辺 裕太郎, 倉橋 貴彦, 近藤 俊美, 古口 日出男, 三次元異材接合体の特異応力場解析における特異要素寸法の影響, 日本機械学会 北陸信越学生会 第 44 回学生員卒業研究発表講演会, pp.1-2, 2015 年 3 月.

(11) 倉橋 貴彦, 黒澤 拓未, SS400-天然ゴム接着接合体に対するはく離試験および応力解析, 日本機械学会北陸信越支部 第 52 期総会・講演会講演論文集, pp.1-2, 2015 年 3 月.

(12) T.Kurosawa and T.Kurahashi, Delamination test and stress analysis for SS400-Natural rubber bonded structures, 4th. International GIGAKU Conference in Nagaoka (IGCN), 2015 年 6 月(発表予定)

[図書] (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~kurahashi/freewe b/index.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

倉橋貴彦 (KURAHASHI TAKAHIKO)

長岡技術科学大学・機械系・准教授

研究者番号:

00467945

(2) 連携研究者

古口日出男 (HIDEO KOGUCHI)

長岡技術科学大学・機械系・教授

研究者番号:

90143693