

## RC-D6「締結・接合・接着部の CAE モデリング・解析・評価 システム構築研究分科会」中間報告\*

服部 敏雄<sup>\*1</sup>, 宮下 幸雄<sup>\*2</sup>, 泉 聡志<sup>\*3</sup>, 佐藤 千明<sup>\*4</sup>, 久保田 祐信<sup>\*5</sup>

### Report on “Research committee for construction of modeling, analyzing, evaluation CAE systems on joint structures”

Toshio HATTORI<sup>\*1</sup>, Yukio MIYASHITA<sup>\*2</sup>, Satoshi IZUMI<sup>\*3</sup>, Chiaki SATOU<sup>\*4</sup>

and Masanobu KUBOTA

<sup>\*1</sup> Gifu Univ. Dept. of Mechanical System Engineering  
Yanagido 1-1, Gifu City, Gifu, 501-1193 Japan

From April 2009 to March 2011 we are progressing the “Research committee for construction of modeling, analyzing, evaluation CAE systems on joint structures”. This committee is consisted of following three subcommittees.

(1) Bolted joint structures, (2) Adhesive joints and (3) Fretting fatigue.

Now these subcommittees have given many results, so we will make an interim report taking advantage of this conference.

**Key Words** : Bolted joint, Adhesive joint, Fretting fatigue, CAE system, Design tool,

## 1. 緒 言

1.1 分科会全体概要 締結・接合部は、機器・製品の信頼性を確保する上で最も重要な部位であるにも関わらず、力の流れが複雑で力学解析が難しい、力学解析・プロセス解析と広範な技術が必要とするなどの理由から、大きな研究テーマとして取り上げてこれなかったきらいがある。しかしボルト型機の主脚収納扉ボルト脱落のトラブルの後、チャイ航空機のスラットヒンジボルト脱落・炎上事故を起こす。ナガシマランドジェットコースター車軸ボルト脱落事故の後、エキスポランドジェットコースター車軸破損事故を起こす。エレベータブレーキ取付ボルトの緩みによる暴走事故の後、エスカレータ固定ボルトの破損、暴走事故を起こす。トレーラハブの事故での教訓があったにも関わらず、ゆりかもめ車軸ハブの同様な事故が繰り返される状況を見るに、これらの技術早期確立は機械エンジニアの社会的責任とも考えられる。このような視点に立って、これまで機械学会部門内研究会、分科会を通してこれら継手部の要素技術の確立に努めてきた。現在は、これらの成果を CAE システムツールに落とし込み、実際の機器の設計・開発、品質保証の現場で使えるようにすべく、機械学会 RC-D 分科会を活動母体として展開させていただいているのでその中間成果報告をさせていただく。

1.2 具体的内容 例えば図 1 中央に示す 3 本の梁を 4 種類の締結方法で組み立てたとすると、この構造物に外力が加わった場合の各梁の荷重分担は、この 4 種類の締結部の等価剛性が分から

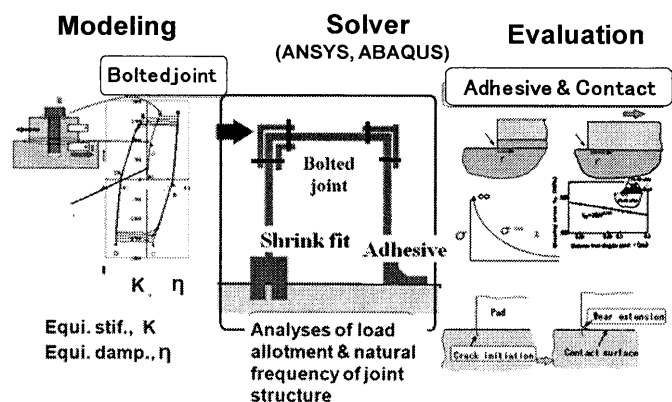


Fig. 1 One-through CAE design tool

<sup>\*1</sup> 正員, 岐阜大学 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)  
E-mail: hattori@gifu-u.ac.jp

ないと正確に構造解析できない。本分科会では、表1のWG活動をもとに、個々の締結・接合部の詳細解析実験検証を行い、これら等価剛性および個々の要素技術をデータベースとしてまとめる。要素技術としては、ねじ締結WGでは、軸直角方向あるいはねじり負荷下のゆるみ挙動の解明、接着WGでは接着接合部ラウンドロビン試験を行い、標準評価法の確立、フレッティングWGでは、接触端部の応力分布、き裂進展挙動、摩耗挙動に基づいた強度・寿命評価法の確立、応力緩和溝等の対策技術への適用を目指す。これらの要素技術は、ものづくり産業界の設計現場で使われているCAE設計システムのモデル化、評価用データベースに落とし込む必要があり現在具体的に推進中である。

Table 1 Organization/role map of committee RC-D6

WG	Databases for CAE		Standardization of test	Chair of each WG
	Modeling (Pre.)	Evaluation(Post.)		
Bolted joint	Internal load ratio Equivalent stiffness Equivalent damp. fac.	Fatigue strength Loosening	Axial loading Transverse loading Thermal cycle	T. Kagiwada S. Izumi
Adhesive	Elements for adhesive interface & bond edge Properties of material	Multi-axial stress Surface energy Stress singularity Fracture mechanics	Standardized TP Lap, Butt, Tear, Delamination da/dN Thermal cycle	C. Satou M. Iwasa
Fretting	Contact problem Explicit/Implicit od ABAQUS, DYNA	Crack initiation Wear Crack propagation	JSME S015	M. Kubota N. Nishimura

## 2. 各WG報告

2.1 ねじ締結WG 軸直角方向外力を受けるボルト締結体を対象として、接触面における力学的挙動のモデル化に基づき、締結体挙動の簡易的な評価を可能とする力学モデルを構築した。有限要素法を用いて本研究でモデル化を行う荷重変位関係と回転ゆるみのメカニズムを解明し、微小座面すべり状態を対象として荷重変位関係をモデル化した。まず、並進変位がボルトの曲げ変位と、接触面におけるすべり変位に関する5つの要因から成ることを示した(図2参照)。これらの要因に寄与する接触面の力学的挙動として、ねじ面とボルト座面に発生する反作用モーメントと、接触力とすべり変位分布のモデル化手法を提案した。これまでに提案されている締結体挙動に関する理論を使用することに加え、接触面のすべり剛性に相当するパラメータを導入してすべり変位のモデル化を行った(図3参照)。次に、荷重変位関係のモデルを拡張して、回転ゆるみ挙動をモデル化した。完全座面すべり時の挙動をモデル化し、ゆるみ回転角から締結力の減少量を求める定式化を行った。提案するモデルによる計算結果を示し、FEMおよび実験で得られた荷重変位関係と回転ゆるみ挙動を再現できることを確認した。また、微小座面すべり状態から完全座面すべり状態に移行し、締結力の消失に至る過程を示した。すべり剛性に相当するパラメータは、ボルト呼び径、ピッチサイズ、摩擦係数の影響を受けることを示した。本手法をその他の荷重モードを扱えるよう拡張することにより、締結体挙動の一般的なモデル化が可能となると思われる。なお、本研究の成果の一部は、日本機械学会論文集中に投稿し、採択されている<sup>(1)</sup>。

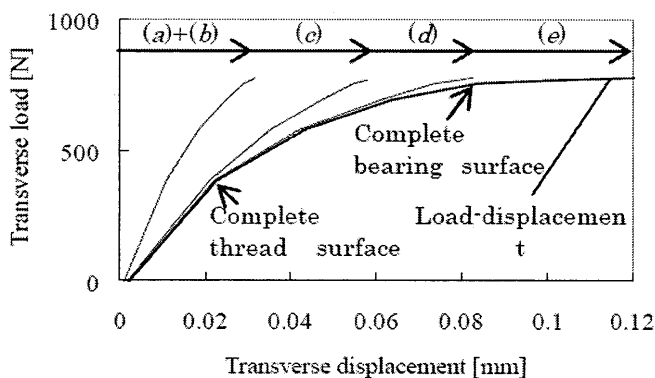


Fig. 2 Factor analysis of transverse displacement

(a)+(b) bending deformation of bolt, (c) slant of bolt head, (d) slippage on thread contact surfaces, (e) slippage on bearing surface

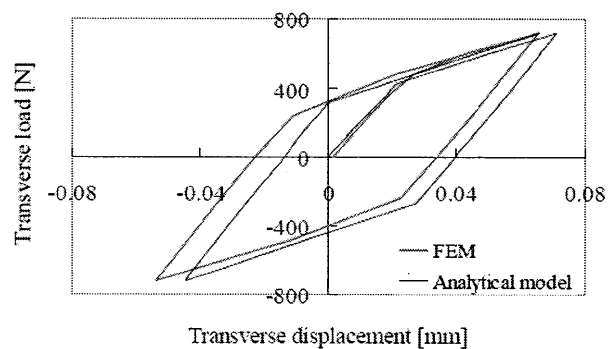


Fig. 3 Comparison of analytical result of our proposed model with FEM result

## 2.2 接着・接合WG

接着接合部ラウンドロビン試験を実施し、主に引き剥がし方向の強度を調べた。また、研究会を4回実施し、本ラウンドロビン試験の実施状況と結果について報告するとともに、接着接合に関する情報交換を行った。

接着接合部ラウンドロビン試験を、長岡科学技術大学、長岡工業高等専門学校および東京工業大学にて実施した。本年度は、接着界面に対し垂直方向の負荷を対象とし、その静的強度を測定した。図4に示す試験片を用意し、上記の3試験機関に配布し、接合作業および強度試験を実施した。

接着剤としては2液エポキシ接着剤を用い、接合治具により固定して接合を実施した。また強度試験は各試験機関の試験を用いて個別に実施した。図5に試験の様子を示す。図6に示すように、本試験片の荷重—変位線図は概ね線形であり、最大荷重に達すると速やかに脆性破壊した。またこの最大荷重を強度みなすと、3試験機関での試験結果は概ね一致した。破断面を観察したところ、図7に示すように接着剤内の凝集破壊が支配的であった。

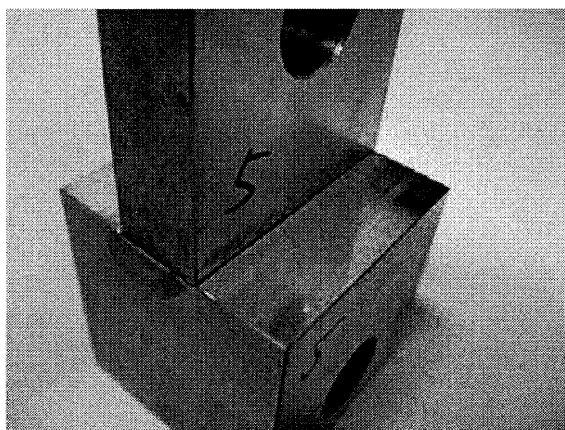


Fig. 4 Example of adhesive test piece

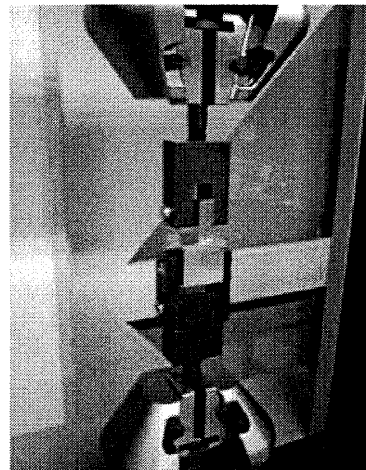


Fig. 5 Adhesive strength test jig

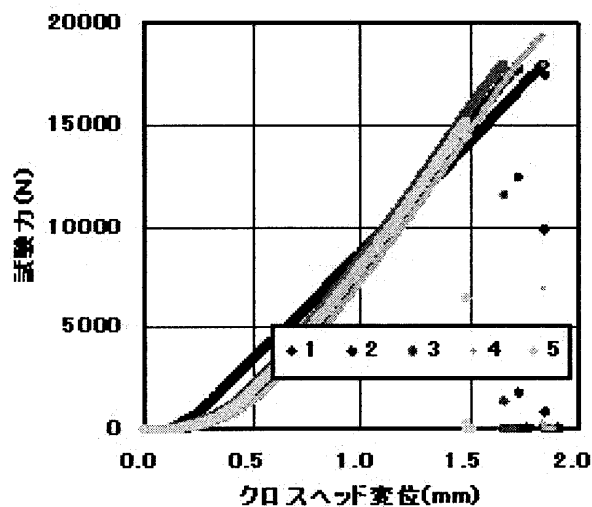


Fig. 6 Load-displacement diagrams

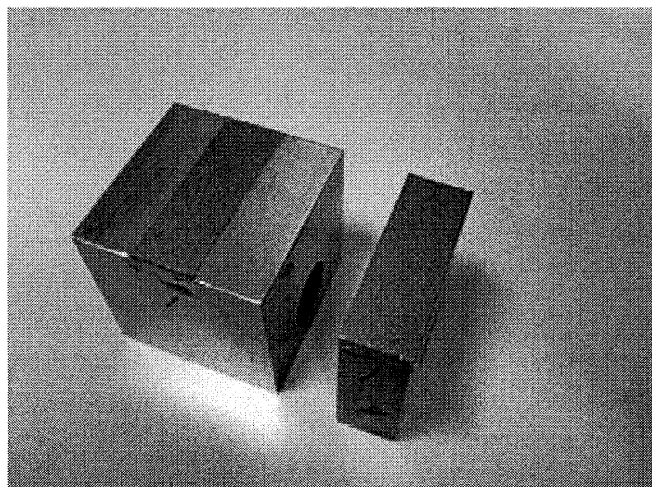


Fig. 7 Example of failure surface

### 2.3 フレッシングWG

フレッシングWGでは、一般に使われているフレッシング疲労対策としての応力緩和溝の効果の定量的検討を行い、汎用的な強度設計にまでまとめた。図8にその応力緩和溝の形状定義を示す。図9に疲労試験、FEM解析結果に基づいて最大強度となる形状パラメータの探索状況を示す。結局、図10に示すように、パラメータ  $\theta \times d/D$  で換算すると疲労限が一本の直線にまとめられることが分かった。非常に使いやすいパラメータであり、積極的に設計で供して頂きたい。

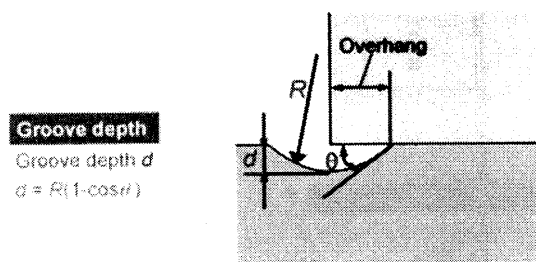
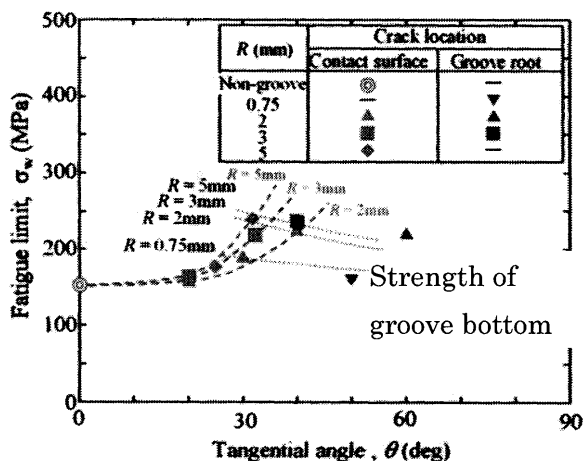
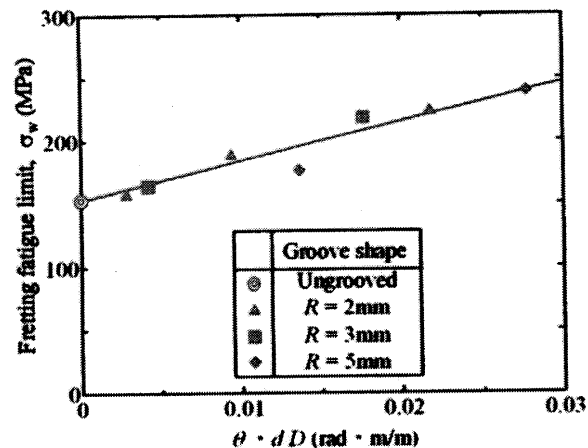


Fig. 8 Geometry parameters of groove


Fig. 9 Fatigue limits for each groove angle  $\theta$ 

Fig. 10 Proposed unified parameter  $\theta \times d/D$  for fretting fatigue limit estimation

また、これまで接触端部のフレッティング摩耗と接触端部に発生した微小き裂の破壊力学解析に基づく、高サイクル負荷下のフレッティング疲労限の予測も行ってきたが、本分科会では、図 11 に示す様な回転機械の起動停止に伴うような低サイクルフレッティング疲労強度・寿命の予測法の開発を特定位置応力法を用いて行った。この特定位置応力法は、一般の応力集中部位の疲労限を、その素材の平滑材疲労限  $\sigma_{w0}$  と、き裂進展限界応力拡大係数範囲  $\Delta K_{th}$  より求められる特定距離  $r_c$  の応力を用いて評価するものであるが、ここではこの評価法を、低サイクル疲労強度・寿命の評価にまで展開したもので、具体的にはその素材の平滑材の S-N 曲線、静的強度  $\sigma_B$ 、破壊靱性値  $K_{IC}$  を用いて求める方法である。図 12 にその予測法の概略を示すが、まず、素材の  $\sigma_{w0}$  と、 $\Delta K_{th}$  より求められる疲労限用特定距離  $r_c$  を求め、

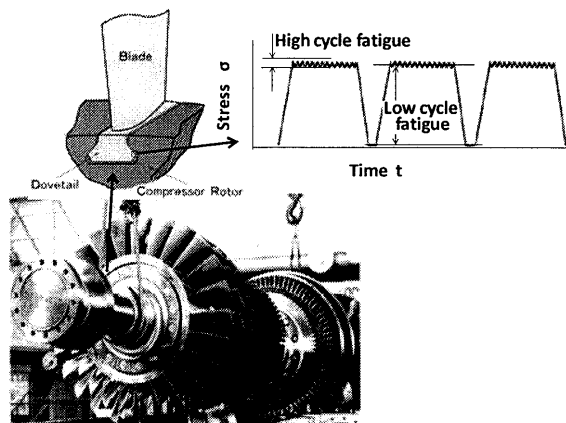


Fig. 11 Low cycle fretting fatigue of gas-turbine blade connection

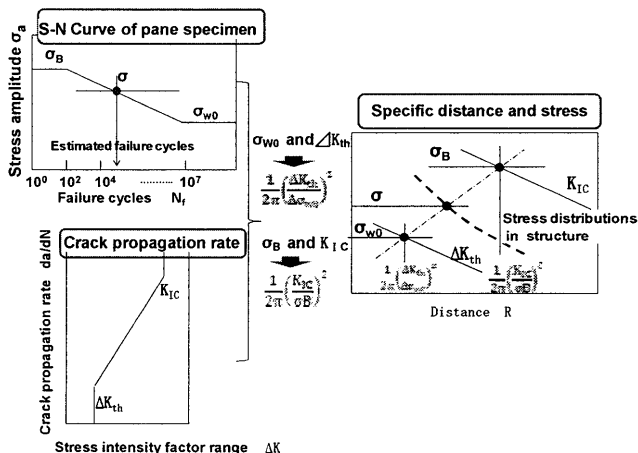


Fig. 12 Low cycle fretting fatigue life estimation methods

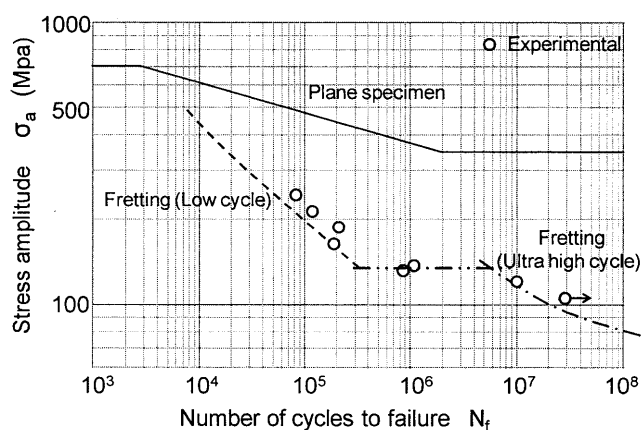


Fig. 13 Fretting fatigue S-N curves

次に同様に素材の  $\sigma_B$  と、 $K_{IC}$  を用いて、静的強度用特定距離  $r_c'$  を求め、これら両者を、一点鎖線のように直線でつなぎ、低サイクル疲労条件下での特定距離はこの一点鎖線上にあると仮定した。その場合、実際の構造物、部材の実働負荷下の応力分布を破線のようにこのグラフ上に投影すると、一点鎖線との交点はその応力分布条件での特定距離、及び評価応力  $\sigma$  となり、この評価応力を、素材の S-N 曲線上に投影すると、この応力分布での疲労寿命が予測できることになる。この方法で、以前行った Ni-Mo-V 鋼のフレッティング疲労試験結果に適用、実

験結果と比較した結果を図 13 に示す。一点鎖線、二点鎖線で示す以前求めた高サイクル領域と同様、破線で示す今回の低サイクルフレッティング疲労強度・寿命の予測結果は、実験結果と比較的によく一致しており、妥当性が確認できた<sup>(2)</sup>。

### 3. まとめと今後の進め方

これまでの WG 活動で、各分野の主要要素技術、例えば

1. ねじ締結 WG では、ゆるみ限界相対すべり条件の把握、
2. 接着 WG では、破断モードと破断強度のばらつきと、接着端応力分布を用いた強度評価、
3. フレッティング WG では、摩耗、き裂進展を用いたフレッティング疲労限の予測と、特定位置応力法を用いた低サイクルフレッティング疲労強度の予測

がほぼ確立され、現在これらの要素技術成果の CAE 設計ツールへの落とし込みを進めている。その中でも注力しているものは、接着 WG とフレッティング WG と共同で進めている、接着端・接触端の応力分布の表示と強度評価一貫設計ツールである。

・任意の方向に沿って応力分布をプロットする FEM プリ・ポストのソフト開発

図 14 に接着端部の FEM メッシュ分割の例を、図 15 に解析結果の任意の経路の応力分布プロット例を示す。

これらの応力分布結果から自動的に応力特異場パラメータ  $H$ ,  $\lambda$  を算出、あるいは特定位置応力を抽出する状況を図 16 に示す。このようにして接着端部・接触端部の応力分布からメッシュサイズに依存しない汎用パラメータが自動抽出・算出できるようになればこれまでせっかく要素技術として提案してきたこれらの評価技術が、設計現場の具体的な CAE ツールとマッチングが取れなくて結局は使われてこなかった問題が解決され、やっと広く普及できると考えている。

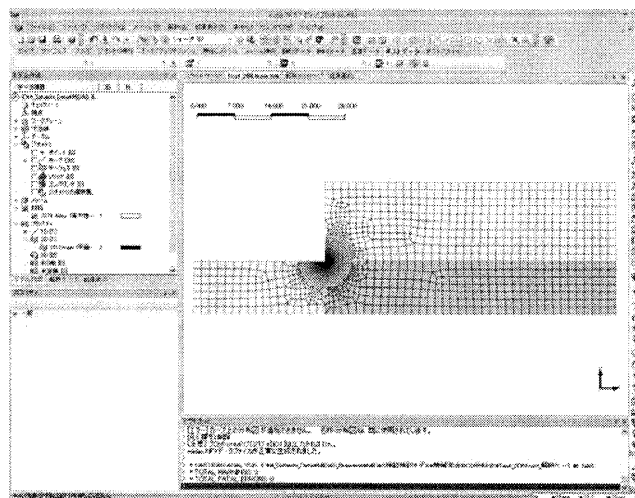


Fig. 14 Auto-meshing near contact or adhesive edges

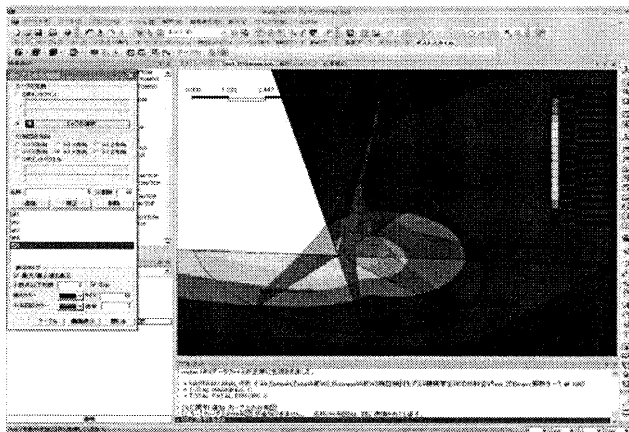


Fig. 15 Auto plotting of stress distributions near contact or adhesive edges

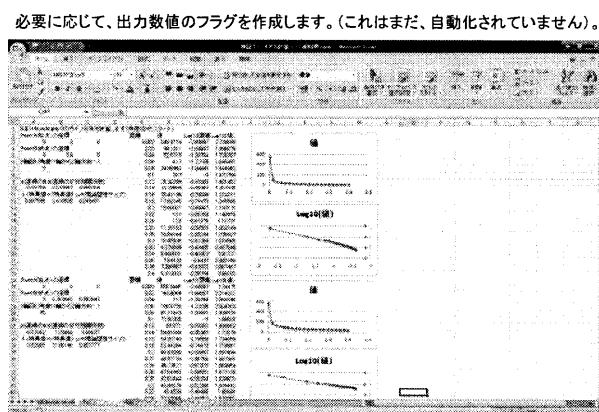


Fig. 16 Auto calculation of stress singularity parameters at contact or adhesive edges

### 文 献

- (1) 横山喬, 泉聡志, 酒井信介, “軸直角方向外力を受けるボルト締結体挙動の解析的モデルの構築 (第 1 報: 荷重変位関係のモデル化)”, 日本機械学会論文集 A 編, 76-763(2010), pp. 351-360.
- (2) , T. Hattori, V. T. Kien and M. Yamashita, “Fretting Fatigue Life Estimation Based on Fretting Mechanisms”, *Proc. of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Fretting Fatigue (ISFF6) Chengdu, CHINA* (Apr. 2010),