一様温度変化を受ける層内に円孔欠陥と充てん物を有する 突合せ接着継手の熱応力と層間はく離*

中 川 文 人^{*1}, 沢 俊 行^{*2}, 勝 尾 正 秀^{*3}

Thermal Stress and Interface Delamination of Adhesive Butt Joints with Circular Hole Defects and Fillers under Uniform Temperature Changes

Fumito NAKAGAWA, Toshiyuki SAWA and Masahide KATSUO

Thermal stress distributions in adhesive butt joints under uniform temperature changes are analyzed using a two-dimensional finite element method. The effects of hole defects and fillers in the adhesive layer on the stress singularity and the delamination growth at the edge of the interface are examined and the amount of delamination growth is predicted using the tensile stress near the edge of the interface. Photoelastic experiments are carried out at room temperature. The delamination growth is measured by a scale when the joints are cooled stepwise. A fairly good agreement is seen between the measured values and the predicted results for the delamination growth and between the results of the photoelastic experiments and the analyses. As a result, it is shown that the hole defects reduce the delamination growth but the effect of the fillers on the delamination growth is small.

Key Words: Adhesive Joints, Thermal Stress, Finite Element Method, Delamination, Stress Concentration, Stress Singularity, Defects, Fillers

1. 結 言

接着接合は航空, 自動車, 精密機器, 電子部品等に多く用いられている組立技術となっている。接着継手に静的荷重や熱的荷重が作用すると, 界面端部に特異応力が生じ, 継手の強度に大きな影響を及ぼす。熱的荷重が作用する接着継手の破壊は, 界面端部から微小なはく離が発生し, はく離が界面に沿って進展し, 最終的に破壊するプロセスが考えられる。接着剤には改質のため充てん物が混合されている。また接着作業では接着剤中に気泡や異物を巻き込みそのまま硬化することがある。このような接着層内部の充てん物や気泡などによる欠陥が界面端部の特異応力や欠陥周辺の応力に及ぼす影響を検討することは, 実用上重要な問題と考えられる。

従来より, 異材接合部の強度に関する研究が多数なされている^{(1)~(11)}。これらの研究では異材接合部全体の不安定破壊をおもに扱っており, 全体の破壊の前に生じる可能性もある微小な安定破壊については検討さ

れていないようである。静的荷重のもとで, 接着継手の層内に含まれる充てん物や欠陥, または界面き裂の影響に関していくつかの研究がある⁽¹²⁾⁽¹³⁾。熱的荷重のもとでも, 接着層内部の円孔欠陥や充てん物の影響に関していくつかの研究がある^{(14)~(17)}。しかし, これらの欠陥等が界面端部から開始することが予測されるはく離進展に及ぼす影響に関してはほとんど研究がなされていないようである。

本研究では一様温度変化を受ける突合せ接着継手の, 接着層内に含まれる欠陥および充てん物が接着界面端部の特異応力に及ぼす影響を二次元有限要素法を用いて解析(平面応力)する。さらに接着層をエポキシ樹脂板でモデル化した欠陥あるいは充てん物を有する突合せ接着継手を製作し, 界面端部から開始する微小なはく離進展を測定する。次に界面端部周囲の接線方向応力成分が最大の方向に破壊が生じるとする説⁽⁵⁾を用いて, はく離進展の予測を行い測定値と比較検討する。またははく離進展実験の前に光弾性実験を行いエポキシ樹脂板内部の熱応力分布を測定し解析結果と比較検討も行う。

2. 解 析 方 法

図1は熱応力解析および実験に使用した突合せ接着

* 原稿受付 1996 年 1 月 23 日。

^{*1} 正員, 東京都立航空工業高等専門学校(〒116 東京都荒川区南千住 8-52-1)。

^{*2} 正員, 山梨大学工学部(〒400 甲府市武田 4-3-11)。

^{*3} 正員, 湘南工科大学(〒251 藤沢市辻堂西海岸 1-1-25)。

Fig. 1 Models for experiments and analyses

Fig. 2 Models for FEM analysis

継手を示す。図1(a)は形状・寸法が等しい二つの被着体を突合せ接着し、接着層内には欠陥はなく界面端部にはく離長さ $e_1 \sim e_4$ を有する継手 (Model A_d) を示す。はく離のある場合は添字 d を用い、はく離のない場合と区別する。実験との対応を考え上下の被着体 I の材料をアルミ板とし高さおよび幅をそれぞれ h_1 および $2l$ とする。接着層 II はエポキシ樹脂板でモデル化し、高さおよび幅をそれぞれ $2h_2$ および $2l$ とする。被着体 I、接着層 II および充てん物の縦弾性係数を E_1, E_2, E_3 、ポアソン比を ν_1, ν_2, ν_3 、線膨張係数を β_1, β_2 および β_3 とする。本研究ではこれらの材料定数の温度依存性を考慮せず一定として解析を行った。

図1(b)は中央部に円孔欠陥が1個ある場合 (Model B), 図1(c)は円孔欠陥が3個ある場合 (Model C), 図1(d)は充てん物が3個ある場合 (Model D), および図1(e)は界面上に半だ円の欠陥がある場合 (Model E) を示す。有限要素法 (FEM) による解析には汎用構造解析システム FINAS を使用し、プリ・ポストプロセッサには CADAS/W を使用した。解析は弾性域かつ平面応力状態を仮定し、熱応力解析には4節点四辺形平面応力要素を用いた。図1(a)に示すように座標は接着層の中央に原点 o とする x - y とした。

Fig. 3 An example of element division in FEM analysis (Model D, 3-fillers)

図2は解析モデルを示す。継手が x および y 軸に対称のため継手の右上1/4のモデルを作成した。図2(a)ははく離のないモデル ($e=0 \text{ mm}$, Model A $\sim$ E), 図2(b)は長さ e のはく離のあるモデル ($e=2 \text{ mm}$, Model A $\sim$ E_d) を示す。図1(a) $\sim$ (e)に示す各モデルについて界面端部にはく離長さ e を有する場合とはく離のない場合を解析した。図1(a)の欠陥のない継手についてははく離長さ e が 1 mm および 3 mm の場合についても界面端部およびはく離先端近傍の応力分布を解析した。界面端部およびはく離先端の界面端部近傍の最小要素の大きさは $2 \mu\text{m}$ とし、界面端部近傍の要素はすべて同じ大きさにそろえた。また界面から接着層側へ $2 \mu\text{m}$ の節点上における応力を界面上の応力として使用した。図3は有限要素法解析で用いた要素分割の一例を示す。図1(d)に示す接着層内に3個の充てん物を有する継手の場合であり、総要素数は1438とした。

3. 実験方法

3.1 光弾性実験 一様温度変化を受ける、突合

せ接着継手の接着層内部の熱応力分布を調べるため、図1(a)～(e)に示す突合せ接着継手を各モデルごとに2個ずつ製作し、光弾性実験を行った。被着体材料はアルミ板 ($2l=80$ mm, $h_1=50$ mm, 厚さ $t=6$ mm) を、充てん物は炭素鋼(S45C, 直径5 mm, 長さ6 mm)を使用し、接着層は光弾性実験用のエポキシ樹脂板 ($2l=80$ mm, $2h_2=20$ mm, 厚さ $t=6$ mm) でモデル化した。エポキシ樹脂板と被着体および充てん物はエポキシ樹脂系熱硬化型1液性接着剤(EP128, CEMEDINE)を用いて高温(熱硬化温度: 80°C , 硬化時間: 90 分)で熱硬化させた。その後徐々に冷却し室温でエポキシ樹脂板内部に生じた熱応力に起因する等色線しま次数を測定した。欠陥を有するエポキシ樹脂板はすべてアプレシブウォータージェットによる加工を行った。加工による残留応力は無視できるほど小さいことを確認している。

3・2 はく離進展測定実験 光弾性実験の後、各試験片を冷却装置で -60°C まで一様に段階的に -5°C の割合で冷却し、1日2回各冷却温度ではく離長さを

スケールを用い目視で測定した。図1(a)に示すように、各モデルの4点 ($y=\pm h_2$, $x=\pm l$) の界面端部でははく離長さ ($e_1\sim e_4$) の平均値 $[(e_1+e_2+e_3+e_4)/4]$ を接着長さの半幅 ($l=40$ mm) で除し、はく離長さの割合 [%] を求めた。

3・3 円筒突合せ接着継手の引張試験と熱応力解析 はく離開始応力を求めるため、円筒突合せ接着継手試験片を製作し引張試験を行った。図4(a)にこの試験片の形状・寸法を示す。被着体材料はアルミ合金とし、接着剤は一液性エポキシ樹脂系熱硬化型接着剤(EP128)を用いて10個の試験片を製作した。継手は恒温装置内で熱硬化させ、その後室温まで徐冷した。この円筒突合せ接着継手の被着体と接着剤の材料定数および製作方法は図1に示す突合せ接着継手の場合と同じとした。接着層厚さの測定値は平均 0.05 mm である。材料試験機により、10個の試験片の破壊時の平均引張強さ σ_z は 47.4 MPa となった。引張試験を行った円筒突合せ接着継手の接着層内部には残留熱応力が生じている。そこで図4(b)に示す解析モデルで四角形軸対称要素を用いてFEMによる熱応力解析を行った。円筒突合せ接着継手試験片の一様温度変化 ΔT は -50°C とし、 $\sigma_z=47.4$ MPa として熱応力解析を行った。接着層厚さは測定した平均値の 0.05 mm を採用した。

図5は図4(b)に示す解析モデルで計算した円筒突合せ接着継手の接着界面上の応力分布を示す。図5から界面端部では応力特異性を示しているが、界面上の最大主応力 σ_1 (□印) および応力 σ_z (○印) は引張応力ではほぼ一様であることがわかった。ここで、接着層の引張強さを 47.4 MPa とし、この値をはく離開始応力として採用した。

Fig. 4 Specimen and analytical model for tensile tests

Fig. 5 Stress distributions at the interface of a cylindrical adhesive butt joint

Fig. 6 Stress distributions near the edge at the interface of the joint without delamination ($e=0$ mm, Model A) and the joint with delamination ($e=2$ mm, Model Aa)

4. 解析結果

計算にあたり、図1(a)～(e)に示す各モデルの一様温度変化 ΔT を -50°C とした。図6は図1(a)のモデルAについて、はく離がある場合とない場合について、それぞれ最大主応力および各応力成分を示す。横軸は界面端部からの距離およびはく離先端からの距離(図2)を重ね合わせて対数表示している。なお x_1 は図2(a)に示す界面端部(o_1)からの距離、 x_2 は図2(b)のはく離先端部(o_2)からの距離を示す。図6か

Fig. 7 Maximum principal stress (σ_1) distributions at the interface from the edge of the delaminations (Model A and Model A_d)

Fig. 8 Stress (σ_y) distributions at the interface from the edge of the delamination (Model A and A_d)

Fig. 9 Shear stress (τ_{xy}) distributions at the interface from the edge of the delamination (Model A and A_d)

ら、はく離がある場合(白色印)ははく離のない場合(黒色印)に比べ、最大主応力 σ_1 はわずかに増加し、 σ_y は大きく減少し、 τ_{xy} は増加し、 σ_x はわずかに減少することがわかる。

図7から図9はモデルAの場合の計算結果を示す。図7は界面端部からはく離($e=e_1=e_2=e_3=e_4$)が0, 1, 2および3 mmと進展した場合の最大主応力 σ_1 の変化を示す。横軸は界面端部からの距離およびはく離先端からの距離を重ね合わせて対数表示している。図7からはく離長さが0 mmから3 mmに増加しても最大主応力 σ_1 は変化が小さいことがわかる。

図8は図7と同様に界面端部からはく離が進展した場合の界面端部およびはく離先端近傍の応力 σ_y の変化を示す。横軸は継手自由側面側の界面端部からの距離を示す。この結果応力 σ_y は引張応力で、はく離長さが増加するにつれ減少することがわかる。

図9は図7と同様に界面端部からはく離が進展した場合の界面端部およびはく離先端近傍のせん断応力 τ_{xy} の変化を示す。図9から、はく離長さが0 mmから3 mmに増加するにつれせん断応力が増加するこ

(a) Model A, B, C [without delamination ($e=0$ mm)]
Model A_d, B_d, C_d [with delamination ($e=2$ mm)]

(b) Model A, D, E [without delamination ($e=0$ mm)]
Model A_d, D_d, E_d [with delamination ($e=2$ mm)]

Fig. 10 Stress (σ_y) distributions near the edge of the interface

とがわかる。

図10は図1(a)～(e)に示す各モデルについて、はく離がある場合($e=2\text{ mm}$)とない場合($e=0\text{ mm}$)の界面端部とはく離先端近傍の応力 σ_y の分布を示す。横軸は界面端部およびはく離先端からの位置を対数表示している。差異は小さいが接着層内部の円孔欠陥、充てん物および界面上の半だ円の欠陥孔が界面端部の応力 σ_y に影響を及ぼしていることがわかる。

本研究で扱う突合せ接着継手では、界面端部周囲の接線方向応力 σ_θ は界面方向(x 方向)で最大となり、界面端部からの破壊挙動として、界面方向にはく離進展が生じることが予測される⁽⁵⁾。また界面端部近傍の応力 σ_y の分布は、 x を界面端部からの距離とすると、 $x^{-\lambda}$ (λ は特異性の指数)と $\log x$ の複数の特異性を含んでいる⁽¹⁸⁾。この特異応力を用いて強度を評価する方法はいくつかあるが⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽¹¹⁾、本研究では強度評価の一方法として界面端部から一定の位置での応力の大小を比較することにより強度を考察する方法を採用する。すなわち、界面端部からのはく離進展は、界面端部およびはく離先端から一定の距離の応力 σ_y が、ある限界値(引張強さ)を超えると生じ、限界値以下では進展が生じないと仮定し、はく離進展の推定を行った。はく離がない場合($e=0\text{ mm}$ 、はく離の進展割合0%)は界面端部から、ある場合($e=2\text{ mm}$ 、はく離進展割合5%)は、はく離先端部から0.01 mmの界面上の位置における応力 σ_y を計算する。次にこの位置での応力が接着剤の引張強さ(47.4 MPa)になるような温度差 $|\Delta T|$ を計算し、はく離進展予測を行った。

図10(a)の応力 σ_y の比較では、モデルA(plain type)に対し、モデルB(one hole)は差異が小さく、モデルC(3-holes)は小さな値を示した。したがってモ

デルCはモデルAに比べはく離が生じにくいことが予想される。図10(b)の応力 σ_y の比較ではモデルAに対し、モデルD(3-fillers)は差異が小さく、モデルE(half ellipses)は大きな値を示した。したがってモデルEはモデルAに比べはく離が生じやすいことが予想される。

表1は温度変化 ΔT が -50°C のときの界面端部近傍(図2, $x_1=x_2=0.01\text{ mm}$)の応力値 σ_y と応力 σ_y が接着剤の引張強さ(47.4 MPa)に到達する温度変化 ΔT の値を示す。それぞれはく離がある場合($e=2\text{ mm}$)とはく離がない場合($e=0\text{ mm}$)の値を示している。はく離がある場合とない場合の温度変化 ΔT の

(a) Model A (Plain type)

(b) Model B (One hole)

(c) Model C (3-holes)

(d) Model D (3-fillers)

(e) Model E (Half ellipses)

Table 1 The stress σ_y and the temperature ΔT

Model	σ_y (MPa) ($\Delta T = -50^\circ\text{C}$)		ΔT ($^\circ\text{C}$) ($\sigma_y = 47.4\text{ MPa}$)	
	$e=0\text{ mm}$	$e=2\text{ mm}$	$e=0\text{ mm}$	$e=2\text{ mm}$
A(plain type)	36.4	22.8	-65.2	-104.0
B(one hole)	36.3	23.5	-65.3	-100.7
C(3-holes)	35.2	21.2	-67.4	-111.8
D(3-fillers)	35.5	22.5	-66.8	-105.6
E(half ellipses)	36.6	23.7	-64.7	-100.1

σ_y : The tensile stress at the interface and at the position of 0.01 mm from the edge of the interface.

ΔT : The temperature difference when the tensile stress reaches 47.4 MPa (Tensile strength).

$e=0\text{ mm}$: The delamination growth rate is 0% (e/l).

$e=2\text{ mm}$: The delamination growth rate is 5% (e/l).

Fig. 11 Isochromatic fringe patterns obtained by photoelastic experiments (measured at room temperature)

値からはく離進展の予測を行った。

5. 光弾性実験と解析結果

図 11(a)～(e)は、はく離進展実験の前に行った光弾性実験により得られた等色線しま模様の写真を示す。図 1(a)～(e)に示す各試験片 (Model A, B, C, D and E) にそれぞれ対応している。図 11 から各モデルともに界面端部に応力集中が生じていることがわかる。また、円孔欠陥周縁、充てん物周縁および半だ円欠陥周縁に応力集中が生じていることがわかる。

図 12(a)～(e)は、有限要素法により得られた主応力差の分布を示す。解析では x 軸および y 軸に対称のため接着層の右上 1/4 の部分を示す。図 11(a)～(e)と同様に図 1(a)～(e)に示す各試験片

(a) Model A (Plain type)

(b) Model B (One hole)

(c) Model C (3-holes)

(d) Model D (3-fillers)

(e) Model E (Half ellipses)

Fig. 12 Numerical results of isochromatic fringe patterns obtained by FEM ($\Delta T = -50^\circ\text{C}$)

(Model A, B, C, D and E) にそれぞれ対応している。光弾性実験では等色線しまの次数 N は式 (1) のように表せる。

$$N = \alpha' t (\sigma_1 - \sigma_2) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 α' は光弾性感度 [mm/N], t は試験片厚さ [mm], $(\sigma_1 - \sigma_2)$ は主応力差を表す。本研究では $\alpha' = 0.095 \text{ mm/N}$, $t = 6 \text{ mm}$ とした。図 12(a)～(e)の各図中の等高線に示す各数字は等色線しま次数 N を表す。以上より解析結果と実験結果はかなりよく一致していることがわかる。また、円孔欠陥上下端部 [$x=0$, $y=0$ (Model B)], [$x=0$, $\pm 20 \text{ mm}$ (Model C) および半だ円上下端部 [$x=0$, $y=\pm 5 \text{ mm}$ (Model E)] では x 方向に引張応力が生じ、充てん物上下端部 [$x=0$, $\pm 30 \text{ mm}$, $y=\pm 2.5 \text{ mm}$ (Model D)] では x 方向に引張応力、 y 方向には圧縮応力が生じていることがわかった。半だ円左右界面端部 ($x=\pm 2 \text{ mm}$, $y=\pm h_2$) の最大主応力 σ_1 および応力 σ_y は界面端部 ($x=\pm l$, $y=\pm h_2$) の σ_1 および σ_y に比べやや小さいが界面端部と同様の応力分布を示した。以上より破壊が接着層内部の充てん物や欠陥周縁から開始する可能性のあることも推測される。

6. 実験結果とはく離進展予測値の比較

図 13(a) および (b) は、はく離進展の測定値と、は

(a) Model A, B and C

(b) Model A, D and E

Fig. 13 Comparisons of delamination growth from the edge at the interface

く離進展の予測値の比較を示す。横軸は接着継手の硬化温度と冷却温度との差を絶対値で示す(常温を $|\Delta T| = 50^\circ\text{C}$ とする)。縦軸ははく離長さの割合 [%] の平均値を示す。図 13 中点線ははく離進展の実測結果を示す。実線は表 1 から得られるはく離進展の予測値を示す。

本研究で使用した突合せ接着継手の試験片では、はく離は初め徐々に成長し、ある程度はく離進展が生じた後に大規模なはく離が生じた。すなわち図 8 に示したように、界面端部およびはく離先端近傍の応力成分 σ_y が引張応力で他の応力成分より大きい領域では、はく離は安定成長した。さらに図 9 に示したように、応力成分 τ_{xy} が他の応力成分より大きい領域では、はく離は大規模(不安定成長)に生じることがわかった。

図 13(a)は、モデル A, B および C の場合はく離進展長さの割合を示す。これらの結果より、モデル C の場合は A および B に比べはく離進展が遅くなる傾向のあることがわかった。図 13(b)は、モデル A, D および E の場合はく離進展長さの割合を示す。モデル E の場合は $|\Delta T| = 115^\circ\text{C}$ から急激にはく離が進展しモデル A に比べはく離進展が速くなる傾向を示した。これらの傾向は数値計算による予測結果と同じであり、接着層内部に円孔欠陥がある場合(Model C)ははく離進展が遅くなり、界面上に半だ円の欠陥がある場合(Model E)ははく離進展が速くなることがわかった。充てん物のある場合(Model D)ははく離進展に及ぼす影響が小さく、モデル A とはく離進展が同じ程度であることもわかった。

7. 結 言

接着層をエポキシ樹脂板でモデル化した突合せ接着継手を製作し、継手が一様温度変化を受ける場合、接着層内部の欠陥および充てん物が界面端部の熱応力分布に及ぼす影響と界面端部から開始するはく離進展について検討し、次の結果が得られた。

(1) 接着層内部に欠陥および充てん物がある場合はく離進展に対する影響を実験および FEM による熱応力解析により調べ、欠陥および充てん物がはく離進展に影響を及ぼすことを示した。

(2) 接着層内部に 3 個の円孔欠陥を有する場合は、はく離進展は相対的に遅くなり、界面上に半だ円欠陥を有する場合は、はく離進展は相対的に速くなることがわかった。

(3) 界面端部近傍の垂直(引張)応力を用いてはく

離進展の予測を行った。突合せ接着継手を一様に冷却し界面端部から開始するはく離進展の測定を行った。その結果実験結果と予測値はかなりよく一致することを示した。

(4) はく離進展の実験の前に光弾性実験を行い等色線しま模様を測定し、実験結果と FEM による解析結果はかなりよく一致した。

文 献

- (1) 服部敏雄・坂田荘司・初田俊雄・村上元, 応力特異場パラメータを用いた接着界面強度評価, 機論, 54-499, A (1988), 597-603.
- (2) 服部敏雄, 応力特異場パラメータを用いた接着継手の強度評価, 機論, 56-523, A (1990), 618-623.
- (3) 鄭南龍・結城良治・石川晴雄・中野禪, 接着継手の強度評価への破壊力学の応用(第 1 報, DCB 試験片と単純重ね継手の破壊特性), 機論, 54-506, A (1988), 1895-1902.
- (4) Clark, J. D. and McGregor, I. J., Ultimate Tensile Stress over a Zone: A New Failure Criterion for Adhesive Joints, *J. Adhesion*, 42(1993), 227-245.
- (5) 結城良治・許金泉・Siegfried Schmauder, 異材接合残留熱応力の BEM による簡易解析法とその応用, 機論, 57-536, A (1991), 864-870.
- (6) 山崎利春, アルミニウム/エポキシ突合せ継手の端部特異応力, 機論, 57-544, A (1991), 3029-3036.
- (7) 寺崎俊夫・秋山哲也・三村真也・中西訓, 異材接合継手のはく離温度に及ぼす試験片寸法の影響, 機論, 59-567, A (1993), 2717-2722.
- (8) 結城良治・許金泉, 異材界面端の熱応力・残留応力の対数型応力特異性, 機論, 58-556, A (1992), 2394-2400.
- (9) Adams R. D. and Mallick, V., The Effect of Temperature on the Strength of Adhesively-Bonded Composite-Aluminum Joints, *J. Adhesion*, 43 (1993), 17-33.
- (10) Orsini, H. and Schmit, F., Influence of Residual Thermal Stresses on the Fracture Behavior of Hybrid Bonded Joints, *J. Adhesion*, 43 (1993), 55-68.
- (11) 鈴木靖昭, 鋼のスカフおよびバット継手の引張接着強度(第 1 報, ぜい性接着剤の場合), 機論, 50-451, A (1984), 526-533.
- (12) 池上皓三・神谷公二, 接着界面に欠陥のある円筒突合せ接着継手の強度, 日本接着学会誌, 18-2 (1982), 60-65.
- (13) van der Zande, H. D. and Grootenboer, H. J., A Finite Element Approach to Interface Cracks, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 53-9(1986), 573-578.
- (14) 仲野雄一・天摩勝洋・沢俊行, 層内に円孔欠陥を有する突合せ接着継手の応力解析(引張荷重を受ける場合), 機論, 53-496, A (1987), 2349-2355.
- (15) 沢俊行・天摩勝洋・広島哲・浦江潔, 引張荷重を受ける層内に円形剛体充てん物を有する接着継手の二次元応力解析, 機論, 58-553, A (1992), 1736-1743.
- (16) 仲野雄一・中川文人・沢俊行, 層内に円孔欠陥を有する突合せ接着継手の二次元熱応力解析, 機論, 58-546, A (1992), 250-256.
- (17) 中川文人・仲野雄一・沢俊行, 層内に剛体充てん物を有する突合せ接着継手の二次元熱応力解析, 機論, 58-554, A (1992), 1921-1927.
- (18) 結城良治, 界面の力学, (1993), 70, 培風館.