

中央大学博士論文

Stress Analysis and Shape Optimization of *Goose-neck* Joint  
under Tensile, Bending and Thermal Load

引張、曲げ荷重及び熱負荷を受ける鎌継手の  
応力解析及び形状最適化に関する研究

Takumi Nakamura

中村 匠

博士（工学）

中央大学大学院  
理工学研究科  
精密工学専攻

令和2年度

2021年3月

# 目 次

1 章 緒 論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 木造建築の継手 .....	2
1.3 既往の研究 .....	6
1.4 本研究の目的と構成 .....	11
2 章 応力集中の理論 .....	18
2.1 緒論 .....	18
2.2 代表的な形状における応力集中係数 .....	19
2.3 等価楕円の概念 .....	23
2.4 ノイバーの三角則 .....	24
2.5 任意の切欠き形状における応力集中係数計算式 .....	31
2.6 まとめ .....	34
3 章 一軸引張荷重下での継手応力解析 .....	35
3.1 緒論 .....	35
3.2 継手モデル .....	35
3.3 解析方法 .....	42
3.4 解析結果 .....	53
3.5 継手応力集中係数計算式 .....	74
3.6 継手応力集中係数を最小とする寸法形状 .....	84
3.7 まとめ .....	88
4 章 曲げ荷重下での鎌継手応力解析 .....	90
4.1 緒論 .....	90
4.2 継手モデル .....	91
4.3 解析方法 .....	92
4.4 解析結果 .....	95
4.5 継手応力集中係数計算式 .....	99
4.6 曲げ荷重を受ける場合の継手応力集中係数を最小とする形状 .....	106
4.7 まとめ .....	112
5 章 熱負荷を受けるときの継手部の熱応力解析 .....	114
5.1 緒論 .....	114
5.2 DIC 解析による熱ひずみ解析 .....	115
5.3 FEM 解析による熱応力解析 .....	121
5.4 解析結果 .....	123
5.5 まとめ .....	136
6 章 結 言 .....	138
6.1 結論 .....	138
6.2 今後の課題 .....	140
本研究に関する著者の発表論文と口頭発表 .....	142
謝 辞 .....	143

# 1 章 緒 論

## 1.1 研究の背景

森林は、古くから構造材としての木材、燃料としての薪炭並びに肥料の原料となる落ち葉など人々の生活に必須となる資源の供給源であった。化石燃料の利用が一般化されるまでは、農村においては、森林、農地、人里で物質が持続的に循環する仕組みが構築されていた。また、森林には、資源の供給源としての機能だけでなく、人びとの生活環境や自然環境を保持に必要となる多面的機能を有している。例えば、水源涵養効果による治水・利水機能、二酸化炭素吸収による地球温暖化防止機能などが挙げられる。森林機能を維持するためには、林業による植林→育林→間伐→伐採というサイクルを繰り返す必要がある。日本の森林は、戦後に植林された樹木が伐採適齢期になり、構造材料の供給源として期待されているが、木材価格の低迷等から林業の採算性は大幅に悪化し、林業生産活動の停滞により必要な森林の整備が行われなくなっており、森林の多面的機能の持続的な発揮にも支障をきたすことが懸念されている。このため、木材利用拡大による林業活性化を図るため、木材の用途として大きな割合を占める木造建築での構造材としてより活用することが求められている。

木材の構造材としての効果的利用には、継ぎ手が必要であり、種々の継ぎ手が用いられてきている。継ぎ手とは、長さ方向に木材同士を締結するものである。継ぎ手は、伝統木造建築で用いられているとともに、現代木造建築においても多く用いられている。現代木造建築においては、今まで大工が現場で行っていた継ぎ手の加工を、予め工場では NC 工作機械を用いて自動で加工するプレカット工法が普及してきている。プレカット工法は、工場内で行うため天候条件によらず安定した加工ができ工期短縮が図られるとともに、工程の自動化により大工の技量によらず安定した品質を確保することができる利点がある。また、プレカット工法は、従来の手刻み加工では、作成が困難または時間を要していた複雑な形状の継ぎ手も短時間で作成可能なため、継ぎ手の強度を向上が期待できる。しかしながら、現在多く用いられている伝統的な継手形状は経験的に求められたものである。

代表的な継ぎ手の強度評価に関していくつかの研究が行われているが、継手内部の詳細な応力分布や応力集中部の評価など応力解析に関する研究はあまりなされていない。また、継手部は使用箇所によっては直射日光などにより熱負荷を受けるが、熱負荷により発生する熱応力が継手強度に与える影響も研究されていない。継手強度の向上を図る継手形状の設計にあたっては、荷重を受けた時の継手部の応力集中や熱負荷を受けたときの熱応力による継手強度への影響について解明することが望まれている。

## 1.2 木造建築の継手

### 1.2.1 継手の特長及び用途

#### (1) 継手の特長

二つの部材をつなぐ場合、同一方向の木材をつなぐ部分が「継手」(つぎて)と呼ばれている。また、異なる方向の木材をつなぐ部分は、「仕口」(しぐち)と呼ばれている。連結方法は、古来より様々な方法が考案されており、目的に応じて使い分けられている。

継ぎ手および仕口は、接着剤を用いて部材同士を接着する方式に比べ、リサイクル性が向上し、間伐材の価値向上及びライフサイクル全体を通じた環境負荷低減を図ることができる。継手・仕口の利点として、以下のようなものがある。

- ① 接着剤を使用していないため、接着方式に比べて解体しやすく部材として再使用しやすい。
- ② 接着剤を使用していないため、焼却時に有害物質が発生しない。
- ③ 通常の木材では得られない大きな断面のもの、湾曲した形状のものを作ることができる。
- ④ 内装、家具用の製品においては、色合いの異なる素材を用いることで、単一の素材では得られない装飾的に美しいものを作ることができる。

## (2) 継手の用途

木造建築では、長尺の構造材を作るために2本の部材をつなぎ合わせるために継手が多く用いられる。図1-1は、継手が木造建築に用いられる箇所を示している。特に、日本の伝統的な木造建築工法である木造軸組構法は、「土台」、「柱」、「梁」、「筋違（すじかい）」などの箇所で用途に合わせた継手が用いられている。

木造軸組構法では、柱や梁といった軸材で支える構造であるため、継手は必要な強度を確保していることが求められる。

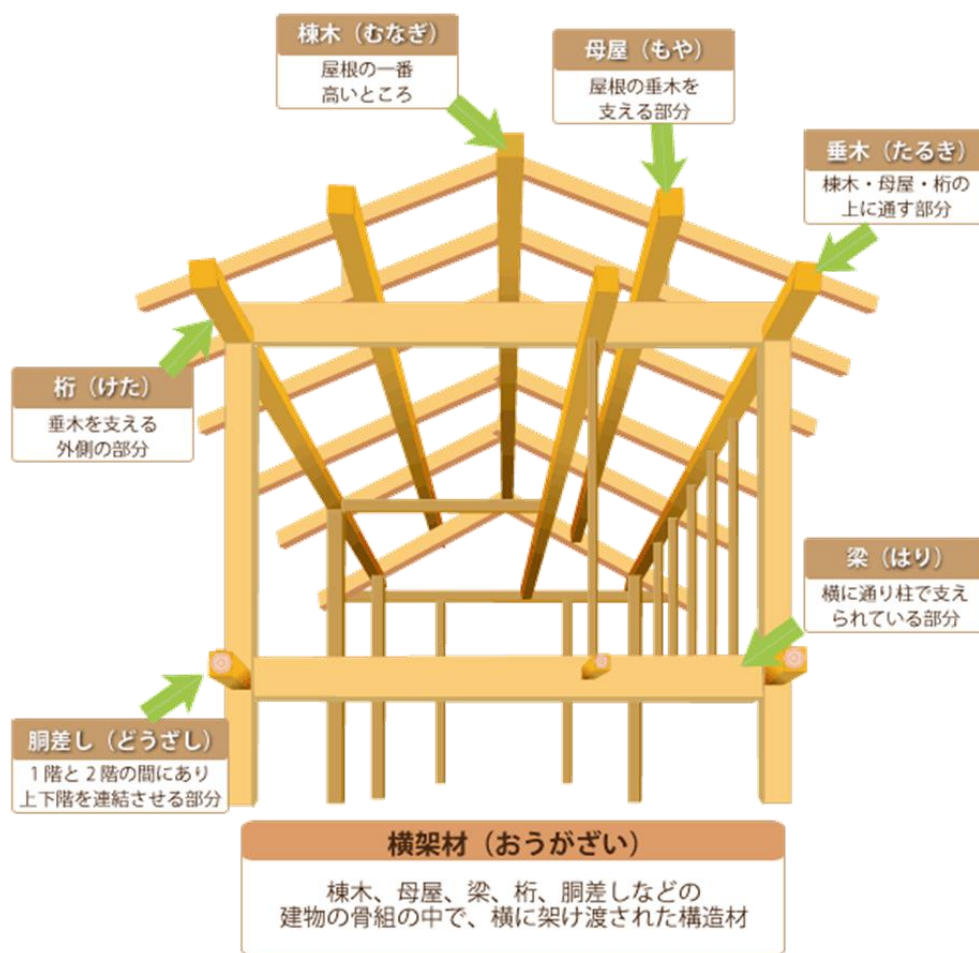


図1-1 木造軸組工法（出典：福井県嶺北木材林産協同組ホームページ）

## 1.2.2 代表的な継手構造

### (1) 蟻継ぎ

蟻継ぎは、図 1-2 に示すように蟻の頭のような形のほぞを用いた継手で、継手としては比較的単純なものである。男木を受け支えるために、腰掛けを設けた蟻継ぎ。腰掛けは、敷面とも呼ばれ敷面蟻継ぎとも呼ばれる。土台、大引き、胴差し、軒桁、母屋などの横架材の継ぎ手として、多く用いられている。

強い力が加わると、男木は繊維方向で欠け、女木は割れる恐れがあるため、引張力が加わらない箇所で行われる。

### (2) 鎌継ぎ

鎌継ぎは、図 1-3 に示すように男木の先端に蛇の鎌首のような台形のほぞを持った継手である。腰掛け鎌継ぎは、男木を受ける部分に腰掛けを設けたもので、土台、大引、胴差し、軒桁、母屋などに広く用いられている。

鎌継ぎは、蟻継ぎに比べて繊維方向のせん断面積が大きいので、引張強度は比較的大きいが、強い引張が加わる箇所には使用されない。また、曲げ耐力は期待できない。

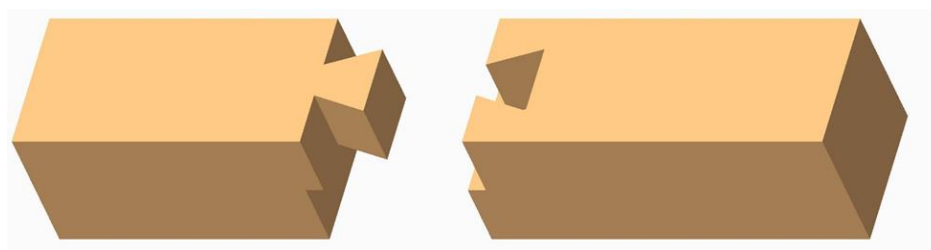


図 1-2 腰掛蟻継ぎ

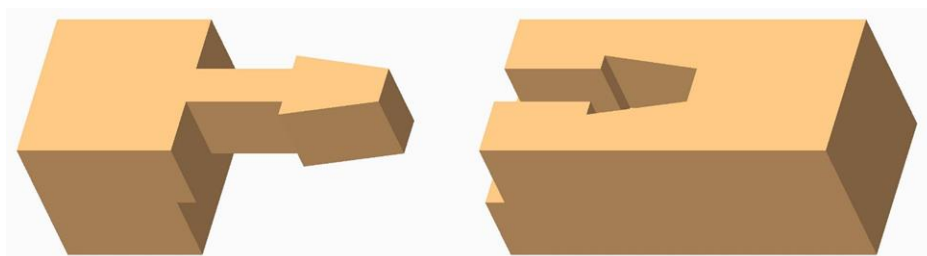


図 1-3 腰掛鎌継ぎ

### (3) 略鎌系

#### ①追掛大栓継ぎ

追掛け大栓継ぎは、図 1-4 に示すように相欠きにあごを付けた略鎌系の継ぎ手の一つで、両部材をはめ込み側面に栓を差して固定する。上木、下木のすべり込み部分には、1/10 程度のすべり勾配を持たせ、二つの材を引き寄せ、胴付き部分が密着するようにする。主に桁、母屋、梁などの継ぎ手として用いられる。継ぎ手の中では、強固なものの一つで、材成（せい）の3倍程度の長さの継ぎ手が最も強度が期待できる継ぎ手である。引張強度は高いが、横方向の曲げ耐力は小さい。

#### ②金輪継ぎ

追掛け大栓継ぎと同様、略鎌系の継ぎ手の一つで、両部材の口にT字形の目違いを付けて組み合わせ、両部材のあご部上面から栓を差して固定する。伝統的継ぎ手の中でも強固なもののひとつで、あらゆる方向に強度が得られるため、柱や梁、桁をつなぐために用いられる。

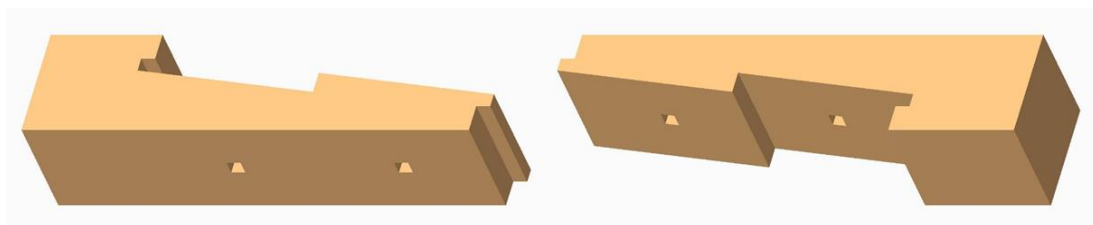


図 1-4 追掛け大栓継ぎ

## 1.3 既往の研究

### 1.3.1 継手強度に関する研究

#### (1) 引張・圧縮強度に関する研究

後藤は、追掛大栓継ぎについて、寸法形状を変えて引張試験を行った結果、かぎ段部（あご部）を傾斜させることで引張耐力を落とさず変形能を向上すること、目違いの寸法を従来寸法より2倍にしたとき耐力が向上することなどを明らかにしている<sup>(1)</sup>。

後藤、中島は、鎌継手について、手加工及び機械加工により作成した継手試験片の引張試験を行い、両者の引張強度を比較した。その結果、機械加工の継手は手加工のものに比べて引張強度、合成に優れていることを明らかにしているが、これは機械加工の継手下面がU字型となっており応力集中が緩和されているためと考察している<sup>(2)</sup>。

西森は、蟻継ぎ、鎌継ぎ、蟻掛け、手加工と機械加工の違い及び加工時の木材の乾燥状態が引張強度の与える影響を調べた結果、機械加工は最大強度を1.2倍向上させる一方最大変位量は低下することを明らかにしている<sup>(3)</sup>。

井らは、引張を受ける鎌継ぎ、追掛継ぎについて、手加工と機械加工に場合の剛性・耐力の差異及び継手種類の違いによる剛性・耐力の差異を明らかにしている。鎌継ぎについては、機械加工は手加工に比べて最大耐力・剛性は上回る。一方、追掛継ぎについては機械加工と手加工による最大耐力・剛性の差異は認められなかった。また、追掛け継ぎの耐力は鎌継ぎに対して耐力が2倍程度大きく、追掛け継ぎは強度面で優れていることを明らかにしている<sup>(4)</sup>。

川村らは、腰掛け鎌継ぎについて、継手寸法が最大荷重、全靱性、初期靱性に与える効果を明らかにするため引張試験を行った。試験の結果、最大荷重は鎌成に比例して大きくなり、全靱性は鎌あご幅に反比例に関係があることを明らかにしている<sup>(5)(6)</sup>。

軽部らは、金輪継ぎ、追掛大栓継ぎについて部材断面積を変えて引張試験を行い、断面積の違いによって継手の破壊形態及び応力-ひずみ線図が異なることを明らかにしている<sup>(7)</sup>。

藤野らは、追掛け大栓継ぎについて、材種、継手長さを変えて引張試験を行った。継手長さが大きくなるにつれせん断面積が大きくなり最大荷重は増加するが、増加率は逓減する。また降伏耐力、初期剛性についてもせん断面積と概ね比例関係にある。また、同じ形状でもベイマツではめり込みが生じず追掛け部のせん断破壊による破壊、スギ材ではめり込みが生じ追掛け部の剥離による破壊も存在するなど材種により破壊形態がことなることを明らかにしている<sup>(8)</sup>。

佐藤らは、腰掛け鎌継ぎについて、鎌せい、鎌頭部長さを変化させて引張試験を行った。その結果、鎌せいが大きくなると最大荷重が増加した。また、鎌あご頭部長さが大きくなるにつれ、破壊形態が、圧縮破壊からせん断破壊に移行することを明らかにしている<sup>(9)</sup>。



宇京らは、張加力下における鎌継のひずみ分布解析を行い、鎌の形状がひずみ分布に与える影響について検討した。その結果、鎌頭部長さ  $L$  と鎌あご幅  $d$  の比  $L/d$  が大きくなると、せん断ひずみの集中度が増加することが示された。この結果及び  $L/d=8$  以上で接合耐力が頭打ちとなったことから、鎌継の接合耐力と鎌におけるせん断応力分布との関係が強く示唆された<sup>(10)</sup>。また、追掛大栓継ぎについて、引張荷重を加えたときの継手部のひずみ分布を測定した。最大荷重時に繊維直交方向ひずみ、せん断ひずみが顎部根本で生じている。また、せん断面におけるせん断応力は顎部近傍に集中している。このことからせん断面の破壊は、せん断応力が主要因となっていることを明らかにしている<sup>(11)</sup>。

戸田、飯島は、腰掛け鎌継ぎ、追掛大栓継ぎ、金輪継ぎについて、継手長さを変えて引張試験を行い、継手長さによって、破壊要因が異なるとを明らかにしている<sup>(12)</sup>。

北田、大和田は、腰掛け鎌継ぎ、目違い腰掛け鎌継ぎ、追掛け大栓継ぎについて引張試験を行い、腰掛け鎌継ぎ・目違い腰掛け鎌継ぎについては、鎌あご幅が大きくなるとせん断破壊しやすい、目違い腰掛け鎌継ぎは腰掛け鎌継ぎよりも 10%強度が増加することを明らかにしている<sup>(13)</sup>。

小林らは、腰掛け鎌継ぎについて、鎌あご幅を変化させて引張試験を行い、鎌頭あご幅の差異による破壊形状の違い、従来の寸法形状ではせん断破壊、めり込み破壊が混在し、鎌あご幅が小さいと圧縮破壊、鎌あご幅が大きいとせん断破壊が支配的となることを明らかにしている<sup>(14)</sup>。さらに、鎌頭部長さを変化させて引張試験を行い、鎌頭長さの差異による破壊形状の違い、鎌頭部長さが長くなるにつれせん断耐力は増加するが一定値を超えると頭打ちになることを明らかにしている<sup>(15)(16)</sup>。

木島、隈澤は、腰掛け鎌継ぎについて、木材の晩材率が異なる部材から試験片を作成し引張試験を行った結果、晩材率が大きいと最大耐力が大きくなること、年輪の角度が引張方向に平行になるにつれ最大耐力が低下することが明らかにしている<sup>(17)</sup>。

辛らは、木材に圧縮荷重、せん断荷重を加えたときの各位置の変位、ひずみを画像解析により測定した。圧縮荷重については木材の半径方向、接線方向でひずみゲージの値とよく一致している。また、せん断荷重については、ひずみゲージの値と異なる傾向を示した<sup>(18)</sup>。

塚原らは、新たに考案したプレカット蟻継仕口について、引張試験、せん断試験を行った。せん断荷重については、仕口長さに対して腰掛長さが大きくなると最大荷重が大きくなること、引張荷重については、材成方向、材軸方向の寸法変化が最大荷重に与える影響が大きいことを明らかにしている<sup>(19)</sup>。

田淵、塩田は、継手長さが異なる金輪継手の圧縮試験を行い、木材の破壊部分を明らかにするとともに、継手長さが大きくなるにつれ圧縮強度が小さくなることを明らかにしている<sup>(20)</sup>。

五十嵐らは、腰掛け鎌継ぎについて引張試験を行い、試験中の継手の CT 画像を撮影し、

せん断面を観察した結果、せん断破壊が生じる前にせん断面に亀裂が生じていること、偏心モーメントの影響によりせん断面下部に亀裂が集中すること、き裂により継手のせん断強度が、試験片のイス型せん断試験により求めたせん断強度より小さくことを明らかにしている<sup>(21)</sup>。

## (2) 曲げ強度に関する研究

河合らは、伝統的な継手形状 12 種及び機械加工の鎌継手 2 種について曲げ試験を行い、荷重-たわみ曲線からそれぞれの継手の破壊パターンを明らかにしている。最大荷重は、略鎌継ぎ、鎌継ぎ、蟻継ぎの順に大きく、剛性については略鎌継ぎ、鎌継ぎが同等で、蟻継ぎが著しく小さい結果となっている<sup>(22)</sup>。

井、井上は、曲げを受ける鎌継ぎ、追掛継ぎについて、手加工と機械加工に場合の剛性・耐力の差異及び継手種類の違いによる剛性・耐力の差異を明らかにしている。鎌継ぎについては、手加工は機械加工に比べて最大耐力・剛性は上回る。一方、追掛継ぎについては、機械加工は手加工に比べて剛性が大きい。また、追掛け継ぎの耐力は鎌継ぎに対して耐力・剛性ともに 3 倍程度大きく、追掛け継ぎは強度面で優れていることを明らかにしている<sup>(23)</sup>。

野村らは、木造建築のプレカット工法の有効性を検討するため、腰掛鎌継ぎについて曲げ試験、せん断試験を行い、機械加工と手加工の破壊性状を比較し、機械加工は手加工に比べ剛性は高くなるものの、靱性が低くなり脆性的になることを明らかにしている<sup>(24)</sup>。

軽部らは、金輪継ぎ、追掛大栓継ぎについて部材断面積を変えて曲げ試験を行い、断面が大きくなると最大曲げ応力が小さくなり、破壊形態は割れ主体から局部圧壊に変化すること明らかにしている<sup>(25)</sup>。

早藤らは、機械プレカットにより作成した腰掛鎌継ぎ及び新形状の鎌継ぎについて曲げ試験を行い、腰掛鎌継ぎについては、従来から用いられてきた基本的な寸法形状が強度上優れていること、また提案した新形状の鎌継ぎの一部は強度性能が著しく向上し、新しい継手としての可能性があることを明らかにした<sup>(26)</sup>。

北田らは、追掛け大栓継ぎについて、鎌顎部のすべり勾配、継手長さを変化させ曲げ試験を行ない、継手部の破壊様態を明らかにしている。また、曲げ剛性、最大耐力の推定式を提案し、最大耐力については、実験結果とよく一致していることを確認している<sup>(27)</sup>。

松窪らは、追掛大栓継ぎをもつ梁及び継手を持たない梁について単調荷重及び繰り返し荷重による曲げ試験を行い、試験体の変位及び継手近傍の局部ひずみを測定した。継手を持つ梁は持たない梁に比べて 25%程度の耐力を示し、継手部の掛りの断面積の大きさが破壊要因となることを愛らかにしている<sup>(28)</sup>。

龍野らは、手加工及びプレカット加工による追掛大栓継ぎの曲げ試験を行った。その結果、最大耐力、曲げ剛性に手加工とプレカット加工とで大きな違いはなかった。また、

最大曲げモーメントは継手内部のせん断破壊に因ることが大きいことを示している<sup>(29)</sup>.

武智らは、追掛大栓継ぎについて継手の寸法パラメータを変えて曲げ試験を行い、継手形状の違いによる破壊性状の差異はないことを明らかにした。また、曲げ剛性は継手のない梁に比べて2~4割であることを明らかにしている<sup>(30)</sup>。

小林らは、追掛大栓継ぎについて材せい、顎幅、継手長さを変えて曲げ試験を行ない、顎幅が初期剛性、回転剛性に影響を及ぼすことと継手長さを長くすると最大耐力と塑性率が向上することを明らかにしている。また、追掛大栓継ぎの曲げ剛性の推定式を提案し、提案式は実験結果によく一致していることを確認している<sup>(31)</sup>。

北守らは、追掛け大栓継ぎについて、継手寸法を変えて引張試験を行い、試験結果より、寸法パラメータから曲げ剛性、最大耐力を計算する式を提案している<sup>(32)</sup>。

辛らは、略鎌継ぎについて、柱幅に対して継ぎ手長さ、継手根本のせい、貫せいの長さを変えて曲げ試験を行った。その結果、接合部の破壊形態は、継手根本の材せいにより異なる傾向を示し、一方、継手長さは影響しないことを明らかにしている<sup>(33)</sup>。

### 1.3.2 木材のひずみ・応力分布解析

河合は、引張りを受ける鎌継手について FEM による弾性解析を行い、引張荷重を受けると女木先端部が外側に開くことで、男木女木共に鎌あご部で材軸と直交方向に引張ひずみが生じることを明らかにしている<sup>(34)</sup>。

宮内らは、引張荷重を受ける蟻継手のひずみ分布をデジタル画像法で測定し、試験片横方向（年輪の半径方向）のひずみ分布は継手形状によらず一定であること、せん断ひずみは蟻継手傾斜角の傾斜角が長手方向に対して大きくなるにつれ大きくなることを明らかにしている。また、種々の寸法形状の継手についてひずみ分布を測定した結果、伝統的に決定された寸法形状は、最適な形状ではなく傾斜を 1/3 にすると引張強度は 25 ~ 35% 改善されることを明らかにしている<sup>(35)</sup>。

宇京らは、引張荷重下での鎌継手男木部のひずみ分布をデジタル画像関連法で測定し、鎌顎部根本にひずみが集中していることを明らかにしている<sup>(36)</sup>。

木島らは、腰掛鎌継ぎについて、引張試験及び FEM による 3 次元弾塑性解析を行い、一般的に採用される寸法形状では、めり込み破壊とせん断破壊が混在し、一般的な寸法よりあご幅が大きい試験片についてはせん断破壊のみであることを明らかにしている。さらに、また、せん断破壊した試験体について、せん断破壊が先に起こることを確認している<sup>(37)</sup>。

西濱らは、曲げ荷重が加わる腰掛鎌継ぎについて有限要素法による弾性解析を行ない、引張試験結果と比較している。初期剛性の値は実験値と 2 ~ 3 倍であったが、両者の応力分布は一致していることを確認している<sup>(38)</sup>。

池田らは、切り込みを入れた試験体で、木質ボードのせん断挙動を画像関連法により解析した結果、切り込み部で初期破壊が起こり、主ひずみ方向に引張破壊が進展してい

くことを明らかにしている<sup>(39)</sup>.

村田らは、節を有する木材の4点曲げ試験を行い、デジタル画像相関法で2次元ひずみ分布解析を行い、木材のひずみ分布解析の精度と問題点を検討した。実験の結果、デジタル画像相関法によってモーメント一定区間のひずみ分布を精度よく測定できた。ただし、曲げ試験において試験片が面外変位し、ひずみ分布測定に影響を及ぼすため、面外変位を計測しひずみ分布の補正が必要となる。2台のデジタルカメラを用いたステレオグラフィによる面外変位計測により補正が可能であることを確認している<sup>(40)</sup>。

Roberti, Bondanelli は、略鎌系継手について、曲げ荷重が作用した時の応力分布を明らかにしている<sup>(41)</sup>。

### 1.3.3 応力集中部を有する木材の強度に関する研究

増田は、中央に長方形の切欠きをもつ梁の曲げ試験について FEM を行い、「ある有限小領域における平均応力が閾値に達した時に破壊が生じる」とする破壊条件である有限小領域理論を提案している。提案した理論は、有限小領域を繊維方向 1mm、繊維に直角方向 0.4mm にしたとき、実験結果とよく一致することを確認している<sup>(42)</sup>。

平井、沢田は、梁全体として切り欠きの存在によるエネルギー変化量に等価なエネルギー変化をもたらすような等価切り欠き形状に置き換える等価切り欠き概念を提案し、切り欠きに曲げ荷重を加えたときのたわみを計算している。等価切り欠き概念により計算したたわみ量は、実験および FEM と比較した結果、実用上十分な精度であることを確認している<sup>(43)</sup>。

### 1.3.4 木材の熱ひずみ、熱応力に関する研究

Wheathermax らは、数種の樹種の線膨張係数を求めている<sup>(44)</sup>。

## 1.4 本研究の目的と構成

### 1.4.1 研究の目的

表 1-1 に前項で紹介した既往の研究の分類を示す。木材の継手について、引張試験、曲げ試験による継手強度に関する研究はこれまで多く行われている。また、寸法形状を変えて強度試験を行い、寸法と強度の関係を検討している研究もいくつかある。

一方、継手内の応力分布や応力集中など詳細な応力解析により強度評価を行なった研究は、いくつか行われているが少ない。また、継手内部の詳細な応力分布や応力集中部の評価など応力解析に関する研究は行われていない。従来の研究における引張試験では、継ぎ手は応力集中部から破壊が進むことが確認されているため、引張荷重を受けるときの継手内の応力分布や応力集中係数を明らかにすることは継手強度改良のため重要であると考えられる。

熱ひずみや熱応力に関する研究は、木材の母材の線膨張係数を求めているものがある。

一方、継手が加熱により熱負荷を受けるときに継手内に発生する熱ひずみ、熱応力について詳細に解析した研究は行われていない。継手部に熱応力が発生した場合、継手部に応力集中が発生し、継手部のない一体の部材に比べて大きな熱応力が発生する可能性がある。このため、熱負荷を受けるときの継手内の応力分布や応力集中係数を明らかにすることは、継手が用いられる環境条件における正確な強度を求めるために重要であると考えられる。

そこで、本研究では、代表的な継手形状である鎌継手が、一軸引張荷重及び曲げ荷重を受けるときの応力分布や応力集中について DIC による測定実験及び FEM による応力解析により検討している<sup>(45)(46)</sup>。その結果を元に、男木、女木各々に対する応力集中係数を算出する計算式を提案する。さらに、提案した式を用いて、継ぎ手を一体の部材とするときの、引張荷重に対する最適な形状を求める。また、熱負荷を加えたときの鎌継手の熱応力分布を DIC による測定実験、FEM による解析により、熱負荷により発生する熱応力が継手強度に与える影響を明らかにしている<sup>(47)</sup>。

表 1-1 既往の研究まとめ

	鎌継ぎ	その他継手 (略鎌系, 蟻継ぎ等)	母材
引張・圧縮 強度	(2) 後藤, 中島(1982) (3) 西森(1983) (4) 井ら(1991) (5)(6) 川村ら(1991,1992) (9) 佐藤ら (2002) (10) 宇京ら(2006) (12) 戸田, 飯島(2007) (13) 北田, 大和田(2007) (14),(15),(16)小林ら(2007~ 2010) (17) 木島, 隈澤(2018) (21) 五十嵐ら(2017)	(1) 後藤(1979) (3) 西森(1983) (4)井ら(1991) (7)軽部ら(1995) (8) 藤野ら(2002) (11)宇京ら(2007) (12) 戸田, 飯島(2007) (13) 北田, 大和田(2007) (19) 塚原ら(2013) (20) 田淵, 塩田(2014)	(18) 辛ら(2015)
曲げ強度	(22) 河合ら(1983) (23) 井, 井上(1992) (24) 野村ら(1992) (26) 早藤ら(1998)	(22) 河合ら(1983) (23) 井, 井上(1992) (25) 軽部ら(1996) (27) 北田ら(2009) (28) 松窪ら(2006) (29) 龍野ら(2006) (30) 武智ら(2008) (31) 小林ら(2009) (32) 北守ら(2009) (33) 辛ら(2016)	
ひずみ分布	(10) ,(36)宇京ら(2006) (34) 河合(1986)	(11) 宇京ら(2007) (35) 宮内ら(2006)	(39) 池田ら(2006) (40) 村田ら(2005)
応力分布	(37) 木島ら(2009) (38) 西濱ら(2016)	(41) Roberti ら(2013)	
応力集中	<b>(45),(46)中村ら(2019,2020)</b>		(42) 増田ら(1986) (43) 平井, 沢田(1979)
熱ひずみ	<b>(47) 中村ら(2019)</b>		(44) Wheathermax, Stamm (1946) <b>(47) 中村ら(2019)</b>
熱応力	<b>(47) 中村ら(2019)</b>		

## 1.4.2 本論文の構成

2章では、継手の応力集中係数の計算式の提案に必要となる応力集中の理論及び計算式について説明する。はじめに基本的な問題である円孔及び楕円孔並びに双曲線の切り欠きを有する応力集中係について説明する。さらに、任意の切り欠き深さを有する平板を有する応力集中係数を楕円孔および双曲線の切り欠きの応力集中係数から求めるノイバーの三角則及び野田らが提案したノイバーの三角則からより精度の高い応力集中係数を求める補正式について説明している。これらの既往の研究を基に、任意の切り欠き深さの筆者が提案する計算式について説明する。

3章では、鎌継手に引張荷重が作用したときの継手内の応力解析を行い継手部の応力分布及び応力集中を明らかにし、解析結果を基に継手の応力集中係数計算式を提案する。応力解析は、継手の引張試験を行ったときのひずみ分布をデジタル画像相関法 (DIC) により測定し応力分布を計算する方法、FEM による接触弾性解析による方法により行う。試験片の材質は、はじめに解析が容易な等方性材料を選択し、アクリル材、中密度繊維材 (MDF 材) を用いている。次に直交異方性材料である木材で解析を行い、樹種はアガチス材 (南方針葉樹林材) を用いている。応力解析により継手部の各ひずみ成分、応力成分の分布及び応力集中箇所を明らかにしている。さらに、DIC 及び FEM の結果を比較することで、両解析の妥当性を検証する。次に、継手の寸法パラメータを変えて FEM を行い、寸法パラメータと応力集中係数を変えたときの関係を求める。FEM 結果をもとに、任意の寸法形状について寸法パラメータから応力集中係数を求める計算式を導出する方法を説明する。さらに、計算式から継手応力集中係数を最小にする形状を提案している。

4章では、鎌継手に曲げ荷重が作用したときの継手内の応力解析を行い継手部の応力分布及び応力集中を明らかにし、解析結果を基に継手の応力集中係数計算式を提案する。応力解析は、FEM による接触弾性解析による方法により行う。試験片の材質は等方性材料としてアクリル材を、直交異方性材料としてアガチス材 (南方針葉樹林材) を選定している。提案した計算式を基に、計算式から継手応力集中係数を最小にする形状を提案する。さらに得られた最適形状について引張荷重下での最適形状との比較を行っている。

5章では、継手部に熱負荷が作用したときに継手部に生じる熱ひずみ及び熱応力を解析し、熱応力が引張強度に与える影響を明らかにする。熱ひずみ解析は、熱負荷が与えられた継手について DIC による熱ひずみ分布およびサーモグラフィによる温度分布を観察し、これらの結果から熱ひずみを測定する。次に、FEM において、解析モデルを熱負荷試験に適合するよう設定し、構造-伝熱の連成解析を行い、熱応力分布を求めている。

6章では、各章の内容及び得られた成果を総括している。

## 参考文献

- (1) 後藤一雄, 追掛大栓継の引張強度について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1979), pp.1769-1770.
- (2) 後藤一雄, 中島卓治, 鎌継の引張り強さについて (木造継手の研究 No.4), 日本建築学会大会学術講演梗概集(1982), pp.2053-2054.
- (3) 西森進, 機械加工による軸組工法接合部の引張耐力について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1983), pp.2199-2200.
- (4) 井英浩, 井上正文, 本多祥二, 機械加工による在来木造継手の剛性・耐力について (その1) 腰掛け鎌継ぎ及び追掛大栓継ぎの引張実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1991), pp.79-80.
- (5) 川村清志, 吉岡丹, 宮國勉, 木造継手の強度性状に関する実験的研究—腰掛鎌継ぎの引張試験 その1—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1991), pp.75-76.
- (6) 川村清志, 宮國勉, 木造継手の強度性状に関する実験的研究—腰掛鎌継ぎの引張試験 その2—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1992), pp.35-36.
- (7) 軽部正彦, 小松幸平, 原田真樹, 伝統的継手を用いた集成材接合部の力学的性能—その1 引張試験—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1995), pp.123-124
- (8) 藤野栄一, 佐藤俊平, 大橋好光, 在来継手の引張耐力に関する研究—その2 追掛け大栓継ぎ—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2002), pp.99-100
- (9) 佐藤俊平, 藤野栄一, 大橋好光, 在来継手の引張耐力に関する研究—その1 腰掛け鎌継ぎ—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2002), pp.97-98
- (10) 宇京斉一郎, 林知行, 原田真樹, 軽部正彦, 引張力を受ける鎌継手のひずみ分布解析—鎌の寸法・形状の影響の検討—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2006), pp.119-120
- (11) 宇京斉一郎, 軽部正彦, 原田真樹, 林知行, 引張力を受ける追掛大栓継ぎのひずみ分布解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2007), pp.139-140
- (12) 戸田正彦, 飯島敏夫, 伝統的木造住宅の接合部の強度性能—その1 継手の引張性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2007), pp.135-136
- (13) 北田祐一, 大和田義正, 在来木造継手の強度特性に関する研究—腰掛け鎌継ぎ・追掛け大栓継ぎの引張試験—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2007), pp.133-134
- (14) 小林直樹, 北田祐一, 大和田義正, 在来木造継手の強度特性に関する実験的研究—腰掛け鎌継ぎの引張試験—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2008), pp.509-510
- (15) 小林直樹, 栂山健二, 大和田義正, 在来木造継手の強度特性に関する実験的研究(2)—鎌頭長さの異なる腰掛け鎌継ぎの引張試験—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2009), pp.151-152
- (16) 小林直樹, 栂山健二, 木島裕行, 大和田義正, 腰掛鎌継ぎの引張強度特性に関する



- 研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2010), pp.69-70
- (17) 木島裕行, 隈澤文俊, 腰掛鎌継ぎの引張強度特性に関する研究—その5 年輪角度と晩材率がせん断耐力に与える影響—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2018), pp.391-392
- (18) 辛殷美, 西濱惇矢, 藤田香織, 継手を持つ柱貫接合部の曲げ性能に関する研究 その4: 実験との比較による画像解析の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2015), pp.161-162
- (19) 塚崎英世, 梅津二郎, 小松幸夫, プレカットシステムによる新形状腰掛蟻仕口の強度特性に関する研究—寸法・形状が強度変化に及ぼす影響—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.686(2013), pp.809-816.
- (20) 田淵敦士, 塩田洋子, 継手長さの違いが金輪継手の圧縮性能に及ぼす影響, 材料, Vol.63, No.4(2014), pp.303-307
- (21) 五十嵐颯, 木島裕行, 隈澤文俊, 腰掛鎌継ぎの引張強度特性に関する研究—その4 CT画像によるせん断面の観察—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2017), pp.501 - 502
- (22) 河合直人, 藤井毅, 内田祥哉, 坂本功, 源愛日児, 伝統的木造継手の実験的研究(曲げ試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集(1983), pp.2201-2202.
- (23) 井英治, 井上正文, 機械加工による在来木造継手の剛性・耐力について(その2) 腰掛け鎌継ぎおよび追掛大栓継ぎの曲げ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1992), pp.31-32.
- (24) 野村裕範, 小西敏正, 上村克郎, 橘高義典, 金子和人, 中村成春, 木造軸組における継手・仕口の力学的性状に関する研究—手加工と機械加工による破壊性状の比較—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1992), pp.33-34.
- (25) 軽部正彦, 小松幸平, 原田真樹, 伝統的継手を用いた集成材接合部の力学的性能 その2 曲げ試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1996), pp.43 -44
- (26) 早藤千佐登, 梅津二郎, 鈴木通友, 機械プレカットシステムを用いた木造継手に関する実験的研究—鎌・新鎌継手の曲げ試験—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1998), pp.39 -40
- (27) 北田祐一, 隈澤文俊, 大和田義正, 追掛大栓継ぎの曲げ特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2009), pp.147-148
- (28) 松窪直人, 松本 渡, 甲津功夫, 追掛大栓継ぎの力学性能に関する実験的研究—継手各部の歪挙動と破壊状況—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2006), pp.113-114
- (29) 瀧野敦夫, 今井克彦, 甲津功夫, 向出静司, 接着重ね梁を用いた追掛大栓継ぎの曲げ性能に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2007), pp.131-132
- (30) 武智清佳, 瀧野敦夫, 向出静司, 甲津功夫, 接着重ね梁を用いた追掛大栓継ぎの力学性能に関する実験的研究(その1) 追掛大栓継ぎの曲げ試験, 日本建築学会大会

- 学術講演梗概集(2008), pp.501-502
- (31) 小林良洋, 蒲池健, 稲山正弘, 追掛け継ぎの曲げ性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2009), pp.153-154
- (32) 北守顕久, 鳥羽真, 鄭基浩, 小松幸平, 金輪継ぎ手の曲げ性能評価—表面効果に注目した検討—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2009), pp.157-158
- (33) 辛殷美, 西濱惇矢, 伊藤弘貴, 藤田香織, 継手を持つ柱貫接合部の曲げ性能に関する研究 その6 略鎌継ぎの寸法変化を対象とした実験の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2016), pp.93-94
- (34) 河合直人, 鎌継の弾性解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1986), pp.1235-1236.
- (35) 宮内一成, 増田稔, 村田功二, 画像相関法による伝統的蟻継手のひずみ分布解析, 材料, Vol.55, No.4(2006), pp.367-372.
- (36) 宇京斉一郎, 林知行, 原田真樹, 軽部正彦, 鎌継手におけるせん断面の繊維方向長さが引張強度に与える影響, 木材学会誌, Vol.53, No.2(2007), pp.90-98
- (37) 木島裕行, 隈澤文俊, 大和田義正, 腰掛け鎌継ぎの引張強度特性に関する解析的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2009), pp.155-156
- (38) 西濱惇矢, 辛殷美, 伊藤弘貴, 藤田香織, 継手を持つ柱貫接合部の曲げ性能に関する研究 その7 略鎌継ぎの寸法影響に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2016), pp.95-96.
- (39) 池田道春, 増田稔, 村田功二, 宇京斉一郎, 画像相関法による木質ボードの面内せん断挙動, 材料, Vol.55, No.6(2006), pp.569-575.
- (40) 村田功二, 増田稔, 宇京斉一郎, デジタル画像相関法による木材のひずみ分布解析—有節材の4点曲げ試験—, 可視化情報学会論文集, Vol.25, No.9(2005), pp.57-63.
- (41) Roberti, G. M., Bondanelli, M., Study and Analysis of XIV Century Timber Built-Up Beams in Verona, Advanced Materials Research, Vol.778(2013), pp.511-516
- (42) 増田稔, 木材の破壊条件に関する理論的考察, 京都大学農学部演習林報告, Vol58(1986), pp.241-250.
- (43) 平井卓郎, 沢田稔, 切欠きを持つ木材梁の曲げ剛性と耐力: 第1報有効曲げ剛性の評価について, 北海道大学農学部 演習林研究報告, 36(2)(1979), pp.387-419
- (44) Wheathermax, R. C. and Stamm, A. J., The coefficient of thermal expansion of wood and wood products, U. S. Forest Prod. Lab. Rpt. 1487(1946), pp.24
- (45) 中村匠, 荒井優子, 小島朋久, 辻知章, 一軸荷重を受ける鎌継手の継手応力集中解析, 日本機械学会 2019 年度年次大会講演論文集(2019), pp.S03104.
- (46) 中村匠, 荒井優子, 小島朋久, 辻知章, 一軸引張荷重を受ける鎌継手の応力解析と応力集中係数計算式, 機械学会論文集 Vol.86, No.886 (2020), 19-00388.
- (47) Nakamura, T., Arai, Y., Yamakami, Y., Tsuji, T., Formulation of joint stress concentration factor and thermal stress of gooseneck joint by using FEM analysis. Proceedings of 12th

International Congress on Thermal Stresses (2019), Hangzhou, China, pp.292-295.

## 2章 応力集中の理論

### 2.1 緒論

継手は、切り欠きや段付き部など形状変化部で局所的に応力集中が発生し、この領域から破壊が進展する。応力集中の度合いは、応力集中部の最大応力を部材の基準となる公称応力で除した値である応力集中係数で表される。応力集中係数は、応力集中部の部材の形状や寸法により異なるため、形状や寸法と応力集中係数の関係を明らかにすることは、応力集中を評価する上で重要である。円孔や楕円孔などを有する無限平板に引張力が加わったときの応力集中係数計算式は、解析的に求められている。また、切り欠きや段付き部などその他の形状の応力集中係数は、等価楕円の概念<sup>(1)</sup>によりそれぞれの形状を楕円孔に置き換えることにより近似的に求めることができる。さらに、有限幅の帯板について、任意の切り欠き深さの応力集中係数計算式は、ノイバーの三角則<sup>(2)</sup>を用いて近似的に求めることができる。ただし、ノイバーの三角則は、最大 10%程度の誤差が生じるため、精度の点で課題がある。野田らは、より正確な応力集中係数を求めるため、体積力法による解析結果を基にノイバーの三角則の補正式を提案し、精度の高い計算式を提案している<sup>(3)(4)</sup>。この式は、精度が高いが、式が複雑であるとともに、適用範囲により複数の式を使い分ける必要があるなどの課題がある。

本研究では、継手の応力集中部の形状を有限幅の帯板に置き換えて応力集中係数計算式を求める。応力集中係数計算式は、利用しやすいよう簡便な式であることが望まれる。そこで、ノイバーの三角則を基に、有限要素法解析 (FEM) など数値解析の結果を基に、任意の切り欠き形状をもつ帯板の応力集中係数を求めることができる簡易な計算式を提案する。

本章では、継手の応力集中係数の計算式に必要な応力集中係数に関する基礎的な理論及び本研究で提案する任意の切り欠き深さに対する応力集中係数計算式について説明する。

## 2.2 代表的な形状における応力集中係数

本節では、代表的な形状の応力集中係数について説明する。

### (1) 円孔を有する無限平板<sup>(5)</sup>

円孔の応力集中は、応力集中の考え方において最も基本となる問題である。

図 2-1 に示すように、遠方で一様な  $x$  軸方向の引張応力  $\sigma_x = \sigma_0$  が作用する無限平板に円孔が存在するとき、円孔の周りの応力集中係数は極座標形式で次式のように表される<sup>(4)</sup>。

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\sigma_0}{2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_0}{2} \left( 1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{4a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_0}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_0}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \tau_{xy} &= -\frac{\sigma_0}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{2r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta\end{aligned}\tag{2.1}$$

上式より円孔縁( $r=a$ )において、 $\sigma_\theta$ は次のようになる

$$\sigma_\theta = \sigma_0 - 2\sigma_0 \cos 2\theta\tag{2.2}$$

上式より、最大引張応力  $\sigma_{max}$  は円孔の大きさに無関係に、点 B で生じ、その値は  $3\sigma_0$  となる。したがって、円孔を有する無限平板が一軸引張応力を受けるときの応力集中係数は、 $\alpha=3$  となる。

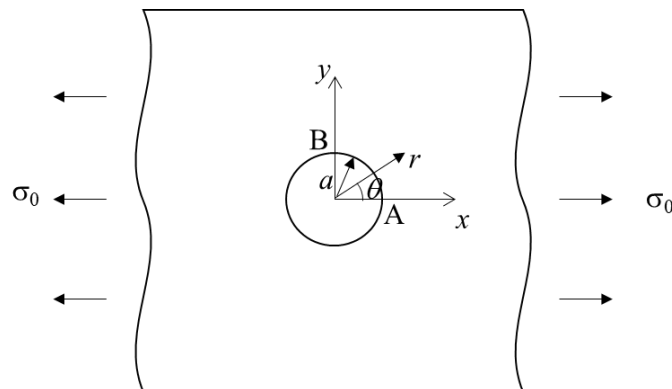


図 2-1 円孔を有する無限平板

(2) 楕円孔を有する無限平板<sup>(6)</sup>

楕円孔に対する応力集中の解は、種々の形状の応力集中の解析を行う上で非常に重要である。等価楕円の概念を用いることで、図 2-2 に示すような楕円のアクペクト比  $b/a$  を変化させることで種々の形状の応力集中係数の近似値を求めることができるからである。

図 2-2 に示すように、遠方で一様な  $x$  軸方向の引張応力  $\sigma_x = \sigma_0$  が作用する無限平板に円孔が存在するとき、 $x$ - $y$  直交座標系における  $y$  軸上の楕円の応力分布は、次式により表される。

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_0} = \frac{1}{\zeta^2 - 1} \left( \zeta^2 + \frac{\lambda}{\lambda - 1} \right) - F_1(\zeta) - F_2(\zeta) \quad (2.3)$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_0} = \frac{1}{\zeta^2 - 1} \cdot \frac{2\lambda + 1}{\lambda - 1} + F_1(\zeta) + F_2(\zeta) \quad (2.4)$$

$$\frac{\tau_{max}}{\sigma_0} = \frac{1}{2(\zeta^2 - 1)} \left( \zeta^2 + \frac{\lambda + 1}{\lambda - 1} \right) - F_1(\zeta) - F_2(\zeta) \quad (2.5)$$

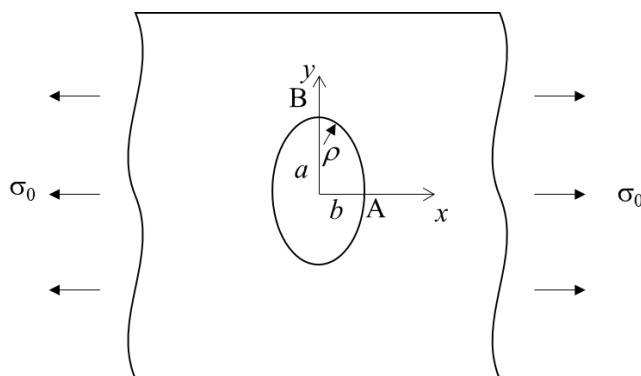


図 2-2 楕円孔を有する無限平板

ただし

$$F_1(\zeta) = \frac{1}{(\zeta^2 - 1)^2} \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda - 1}{\lambda + 1} - \frac{\lambda + 3}{\lambda - 1} \right) \zeta^2 - \frac{\lambda + 1}{(\lambda - 1)^2} \right\} \quad (2.6)$$

$$F_2(\zeta) = \frac{4\zeta^2}{(\zeta^2 - 1)^3} \left( \frac{1}{\lambda + 1} \zeta^2 - \frac{1}{\lambda - 1} \right) \frac{\lambda}{\lambda - 1} \quad (2.7)$$

$$\lambda = \frac{a}{b}, \quad \zeta = \frac{y + \sqrt{y^2 - c^2}}{c}, \quad c = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (2.8)$$

最大応力  $\sigma_{max}$  は点 B で生じ、その値は式(2.3)に  $y=a$  を代入して求められる。

遠方で  $x$  軸方向に引張応力を受ける楕円孔の応力集中係数  $\alpha$  は、 $\sigma_{max}$  を  $\sigma_0$  で除して、以下となる。

$$\alpha = 1 + 2 \sqrt{\frac{t}{\rho}} \quad (2.9)$$

ただし、 $t=a$ ,  $\rho=b^2/a$  とし、 $t$  は切り欠き深さ、 $\rho$  は点 A における曲率半径を表す。

### (3) 双曲線状切欠きを有する板<sup>7)</sup>

図 2-3 に示すように、 $x$  軸方向に遠方で一軸引張荷重を受け、最小断面部( $2a$ )で  $\sigma_x = \sigma_0$  を受ける双曲線状切欠きを有する板について、切り欠き縁( $\beta = \beta_0$ )に沿う応力は、楕円座標系  $(\alpha, \beta)$  で以下の式で表される。

$$(\sigma_\alpha)_{\beta = \beta_0} = \frac{8 \cos \beta_0}{\pi - 2\beta_0 + \sin 2\beta_0} \times \frac{\sin \beta_0 \cosh \alpha}{\cosh 2\alpha - \cos 2\beta_0} \sigma_0 \quad (2.10)$$

最大応力は最狭部  $\alpha=0$  で生じ、この点の曲率半径は  $\rho = a \tan^2 \beta_0$  であるから

$$\begin{aligned} (\sigma_\alpha)_{max} &= (\sigma_0)_{\alpha=0, \beta=\beta_0} \\ &= \frac{4\rho_0 \cot \beta_0}{\pi - 2\beta_0 + \sin 2\beta_0} \\ &= \frac{2 \left( \frac{a}{\rho} + 1 \right) \sqrt{\frac{a}{\rho}}}{\left( \frac{a}{\rho} + 1 \right) \tan^{-1} \sqrt{\frac{a}{\rho}} + \sqrt{\frac{a}{\rho}}} \sigma_0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

応力集中係数は,  $(\sigma_\alpha)_{\max}$  を公称応力  $\sigma_0$  で  $(\sigma_\alpha)_{\max}$  で除して

$$\alpha = \frac{2 \left( \frac{a}{\rho} + 1 \right) \sqrt{\frac{a}{\rho}}}{\left( \frac{a}{\rho} + 1 \right) \tan^{-1} \sqrt{\frac{a}{\rho}} + \sqrt{\frac{a}{\rho}}} \quad (2.12)$$

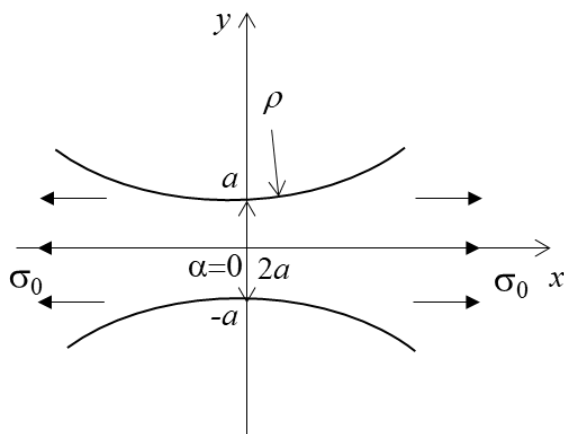


図 2-3 双曲線切欠きを有する平板



## 2.3 等価楕円の概念

円形や楕円形などの基本的な形状については適切な応力関数を設定することで、厳密解を得られることができるが、多くの形状の孔や切り欠きについては、厳密解を求めることは困難である。そのため、種々の形状の正確な応力集中係数を正確に求めるためには、FEM などを利用した数値解析が必要となる。

しかし、等価楕円の概念<sup>(1)</sup>を応用すれば、厳密な解ではないが実用上十分な精度の値を見積もることができる。

等価楕円の概念により孔や切欠きの応力集中係数を求める考え方は次の通りである。

図 2-4 のような正方形の角を丸めた孔があり、遠方で一軸引張応力  $\sigma_x = \sigma_0$  を受けている。点 A の応力集中係数を見積もる場合には、円縁の点 A での曲率半径  $\rho_a$  と同じ曲率半径を持ち、孔の y 方向寸法を長軸の長さ  $2a$  とする楕円を想定する。この近似によって、点 A での応力集中係数  $\alpha$  は以下のように表される。

$$\alpha = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho_a}} \quad (2.13)$$

図 2-4 の点 C での応力集中係数を知りたいければ、上式の  $\rho_a$  を点 C における曲率半径  $\rho_c$  に置き換えることで求めることができる。

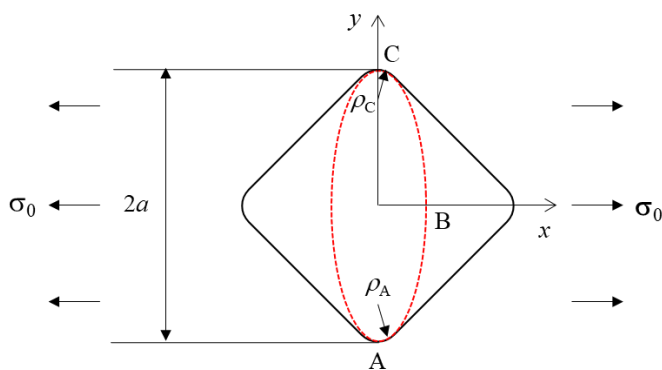


図 2-4 等価楕円の概念を用いた応力集中係数近似

## 2.4 ノイバーの三角則

応力集中係数について厳密解が得られる問題は、前項の円孔、楕円孔、双曲線切り欠きなど非常に限られている。そこで、ノイバーは、楕円孔を有する無限平板の解と深い切り欠きを有する平板の解を用いて有限深さの切り欠きの応力集中係数を推定するノイバーの三角則<sup>2)</sup>を提案した。ノイバーの三角則は近似式であるが、現在においても切り欠きの形状と応力集中係数の関係を調べるためによく用いられている。本節ではノイバーの三角則の考え方を説明する。

図 2-5 に、切り欠き深さ  $t$ 、切り欠き半径  $\rho$ 、切り欠き底の最小断面部の幅  $2a$  の両側切り欠きを有する帯板を示す。浅い切り欠きとは、切り欠き深さ  $t$  が  $2a$  に比べてはるかに小さい場合であり、深い切り欠きとは  $t$  が  $2a$  に比べてはるかに大きい場合である。ノイバーは、浅い切り欠きの応力集中係数  $\alpha_s$  と深い切り欠きの応力集中係数  $\alpha_d$  を用いて、任意の切り欠き深さの応力集中係数の近似値を求める方法について検討した。

浅い切り欠きの場合には切り欠き近傍の応力分布が変化するが、切り欠きから離れた位置の応力分布は一様となる。したがって、浅い切り欠き近傍の応力分布は、切り欠き深さ  $t$  及び切り欠き半径  $\rho$  の影響を受け、板幅  $2b$  の影響は無視できる。すなわち、浅い切り欠きの応力集中係数  $\alpha_s$  は  $t/\rho$  の関数とみなすことができる。

一方、深い切り欠きの場合には、応力分布は  $2a$  および  $\rho$  の影響を受け、 $t$  の影響は無視することができるため、深い切り欠きの応力集中係数  $\alpha_d$  は  $a/\rho$  の関数とみなすことができる。

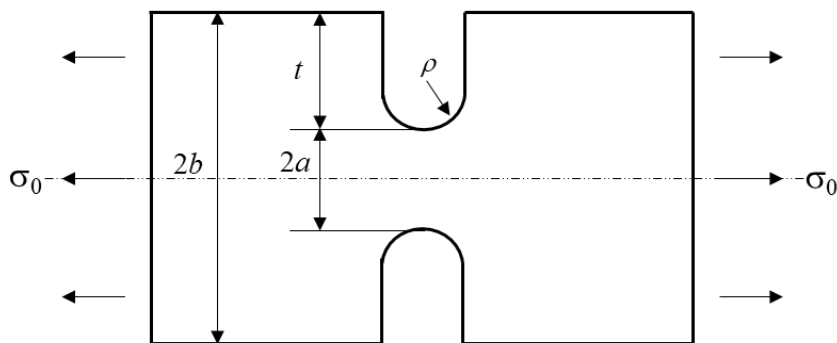


図 2-5 両側切り欠きを有する有限幅の帯板

以上のことから、 $b$  および  $\rho$  を一定に保ち  $t$  を 0 から大きくしていくと、切欠き底の応力集中係数  $\alpha_N$  は、はじめは  $\alpha_s$  が支配的であり、次第に  $\alpha_d$  の影響が大きくなり、最終的には  $\alpha_d$  が支配的になる。

このような状態において、ノイバーは任意の切欠き深さの応力集中係数は、 $\alpha_s$  および  $\alpha_d$  と以下の関係を持つと仮定している。

$$\frac{1}{(\alpha_N - 1)^2} = \frac{1}{(\alpha_s - 1)^2} + \frac{1}{(\alpha_d - 1)^2} \quad (2.14)$$

上式の関係は、図 2-6 に示す  $\alpha_s - 1$  および  $\alpha_d - 1$  を 2 辺とする直角二等辺三角形の直角の頂点から斜辺に下した垂線の長さが  $\alpha_N - 1$  となることを示している。

図より以下の関係が得られる。

$$\alpha_t - 1 = (\alpha_d - 1) \cos \theta \quad (2.15)$$

$$\cos \theta = \frac{\alpha_s - 1}{\sqrt{(\alpha_s - 1)^2 + (\alpha_t - 1)^2}} \quad (2.16)$$

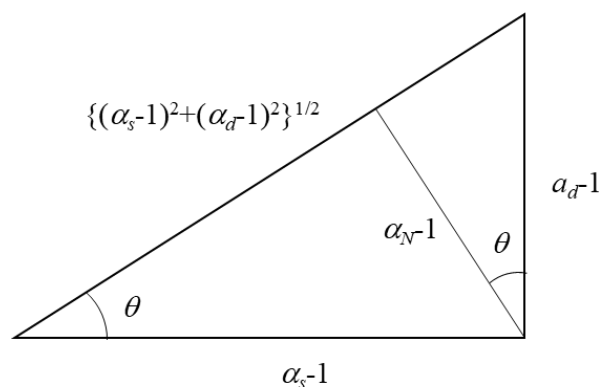


図 2-6 両側切欠きを有する有限幅の帯板

上式より

$$\alpha_N = 1 + \frac{(\alpha_s - 1)(\alpha_d - 1)}{\sqrt{(\alpha_s - 1)^2 + (\alpha_s - 1)^2}} \quad (2.17)$$

ノイバーの三角則を用い，図 2-7 に示す両側に  $60^\circ$  V 字切欠きを有する帯板が引張荷重を受けるときの応力集中係数を求める。

浅い切欠きを有する平板の応力集中係数 $\alpha_s$ は，半無限板の応力集中係数を用い，等価楕円の考え方を適用し以下の式で表す。

$$\alpha_s = 1 + 2 \sqrt{\frac{t}{\rho}} \quad (2.18)$$

他方，深い切欠きを有する応力集中係数 $\alpha_d$ は，式(2.12)の双曲線切欠きの応力集中係数を用い，以下の式で表す。

$$\alpha_d = \frac{2 \left( \frac{a}{\rho} + 1 \right) \sqrt{\frac{a}{\rho}}}{\left( \frac{a}{\rho} + 1 \right) \tan^{-1} \sqrt{\frac{a}{\rho}} + \sqrt{\frac{a}{\rho}}} \quad (2.19)$$

式(2.18)，式(2.19)を式(2.17)に代入すると $\alpha_N$ は， $a/\rho$ および $t/\rho$ の関数として表すことができる。

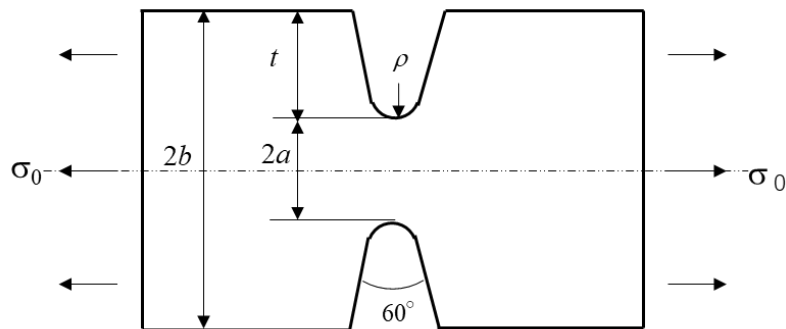


図 2-7 一軸引張荷重を受ける両側に  $60^\circ$  V 字切欠きを有する帯板

ノイバーの三角則が提案された後、切欠きを有する帯板・丸棒の応力集中問題について数多くの研究が行われてきたが、依然としてノイバーの三角則は設計者、技術者に用いられている。これは、ノイバーの三角則が簡便であるにもかかわらず、様々な切欠き形状についてある程度の精度を保ち応力集中係数を見積もることができ大変便利なものであるためである。しかしながら、応力集中による材料の破壊を防ぎ、構造物の安全をさらに確保するためには、さらに正確な応力集中係数を得ることが求められる。野田ら<sup>(2)</sup>は、体積力法を用いて、切り欠きを有する平板の引張問題について切り欠き底の正確な応力集中係数を求めている<sup>(3)</sup>。その結果、ノイバーの三角則は体積力法の結果に対して、最大 10% 程度の危険側の誤差があることがわかった。そこで、野田らは、体積力法により求めた正確な応力集中係数 $\alpha_{N-Noda}$ を $\alpha_N$ で除した $\alpha_{N-Noda}/\alpha_N$ について、 $\varepsilon(=\rho/b)$ および $\lambda(=t/b)$ をパラメータとして最小二乗法を適用し、式(2.20)、式(2.21)に示す $\alpha_{N-Noda}$ の補正係数を求め、正確な応力集中係数計算式を提案している。この補正式を用いることで、誤差 1% 以内で応力集中係数を求めることができる。図2-8に  $b=1$ 、 $\rho=0.1$ としたとき、 $t$ を 0 から 1 まで変化させたときの応力集中係数の変化を表す。黒線がノイバーの三則測、青線が野田の応力集中計算式より求めた値である。両者を比較すると、最大値となる  $t=0.3$  付近でノイバーの三角則により求めた値は野田の計算式の値に比べて 10% 程度小さく、応力集中係数が低く見積もられていることがわかる。

$0.02 \leq \varepsilon \leq 0.1$ ,  $0.02 \leq \lambda \leq 1.0$  において

$$\begin{aligned}
 \alpha_{N-Noda}/\alpha_N = & (0.9860 - 0.2543\varepsilon + 1.3536\varepsilon^2) \\
 & + (0.8141 - 1.8146\varepsilon + 7.7454\varepsilon^2)\lambda \\
 & + (-1.9019 - 2.7027\varepsilon + 10.6611\varepsilon^2)\lambda^2 \\
 & + (0.8497 + 37.6317\varepsilon - 206.130\varepsilon^2)\lambda^3 \\
 & + (1.4758 - 70.8874\varepsilon + 404.947\varepsilon^2)\lambda^4 \\
 & + (-1.2097 + 38.0317\varepsilon - 220.164\varepsilon^2)\lambda^5 \\
 & + (-0.0139 - 0.0054\varepsilon + 1.5961\varepsilon^2)\lambda^6
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

$0.1 < \rho/D \leq 1.0$ ,  $0.02 \leq \lambda \leq 1.0$  において

$$\begin{aligned}
 \alpha_{N-Noda}/\alpha_N = & (0.9735 + 0.0036\varepsilon + 0.0070\varepsilon^2) \\
 & + (0.7227 - 0.2412\varepsilon + 0.0230\varepsilon^2)\lambda \\
 & + (-1.8034 - 2.2175\varepsilon + 1.3980\varepsilon^2)\lambda^2 \\
 & + (1.7308 + 7.0844\varepsilon - 3.3948\varepsilon^2)\lambda^3 \\
 & + (-0.7339 - 6.8807\varepsilon + 2.6137\varepsilon^2)\lambda^4 \\
 & + (0.1099 + 2.2525\varepsilon - 0.6471\varepsilon^2)\lambda^5
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

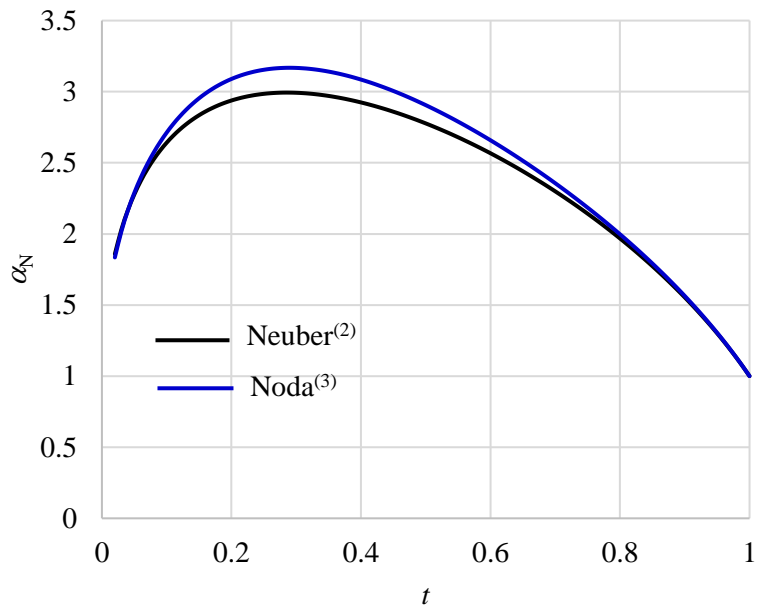


図 2-8 切欠き深さ  $t$  を変化させたときの応力集中係数  $\alpha_N$  の変化

さらに野田らは、段付き部を有する帯板が引張りを受けるときの応力集中係数を同様に求めている<sup>(4)</sup>。フレット部が浅い場合の応力集中係数  $\alpha_s$ 、フィレット部が深い場合の応力集中係数  $\alpha_d$  は、以下の近似式を用いる。  $\alpha_s$  は等価楕円の概念より求めている。ここで、  $(t/\rho)^{1/2}$  の項の係数が 1 となっており、楕円の応力集中係数に比べて小さい。これは、楕円孔の応力集中部は両縁の谷になっているのに対して、段付き平板のフィレット部は片側のみ段差があるため段差がないほうの自由縁での応力開放が生じないためである。  $\alpha_d$  は式(2.12)の双曲線切欠きの式を用いている。

$$\alpha_s = 1 + \sqrt{\frac{t}{\rho}} \quad (2.22)$$

$$\alpha_d = \frac{2 \left( \frac{a}{\rho} + 1 \right) \sqrt{\frac{a}{\rho}}}{\left( \frac{a}{\rho} + 1 \right) \tan^{-1} \sqrt{\frac{a}{\rho}} + \sqrt{\frac{a}{\rho}}} \quad (2.23)$$

ここで、切欠き深さ  $t$ 、段付き部フィレット半径  $\rho$ 、段付き部の最小断面部の幅  $2a$  とする。

$\alpha_s, \alpha_d$ を式(2.17)に代入し、ノイバーの三角則による応力集中係数 $\alpha_F$ を得る。さらに、体積力法により求めた正確な応力集中係数 $\alpha_{F-Noda}$ を $\alpha_F$ で除した $\alpha_{F-Noda}/\alpha_F$ について、 $\varepsilon(=\rho/b)$ および $\lambda(=t/b)$ をパラメータとして最小二乗法を適用し、式(2.24)、式(2.25)に示す $\alpha_{F-Noda}$ の補正係数を求め、正確な応力集中係数計算式を提案している。この補正式を用いることで、誤差1%以内で応力集中係数を求めることができる。

0.03 $\leq\rho/b\leq$ 0.1において

$$\begin{aligned}\alpha_{F-Noda}/\alpha_F = & (0.9992 + 0.0006\varepsilon + 0.1429\varepsilon^2) \\ & + (0.1664 - 12.2250\varepsilon + 75.6610\varepsilon^2)\lambda \\ & + (-3.6913 + 148.420\varepsilon - 897.880\varepsilon^2)\lambda^2 \\ & + (15.1960 - 575.160\varepsilon + 3394.10\varepsilon^2)\lambda^3 \\ & + (-27.8470 + 1015.30\varepsilon - 5701.80\varepsilon^2)\lambda^4 \\ & + (23.7360 - 829.30\varepsilon + 4347.30\varepsilon^2)\lambda^5 \\ & + (-7.5584 + 252.910\varepsilon - 1217.30\varepsilon^2)\lambda^6\end{aligned}\tag{2.24}$$

0.1 $<\rho/D\leq$ 1.0において

$$\begin{aligned}\alpha_{F-Noda}/\alpha_F = & (1.0009 - 0.0039\varepsilon - 0.0029\varepsilon^2) \\ & + (-0.3177 + 0.2545\varepsilon - 0.1795\varepsilon^2)\lambda \\ & + (2.310 - 1.7565\varepsilon + 2.0993\varepsilon^2)\lambda^2 \\ & + (-9.8060 + 15.5080\varepsilon - 15.4150\varepsilon^2)\lambda^3 \\ & + (20.730 - 40.6640\varepsilon + 36.590\varepsilon^2)\lambda^4 \\ & + (-19.9550 + 39.490\varepsilon - 33.7320\varepsilon^2)\lambda^5 \\ & + (7.0391 - 12.8490\varepsilon + 10.6360\varepsilon^2)\lambda^6\end{aligned}\tag{2.25}$$

図2-9に  $b=1$ ,  $\rho=0.1$ としたとき,  $t$  を 0 から 1 まで変化させたときの応力集中係数の変化を表す. 黒線がノイバーの三則測, 青線が野田の応力集中計算式より求めた値である. 両者を比較すると,  $t=0.4$  付近の最大値付近で  $\alpha_F$  がわずかに大きい, 全範囲でほぼ一致している. この補正式を用いることで, 誤差 1%以内で応力集中係数を求めることができる.

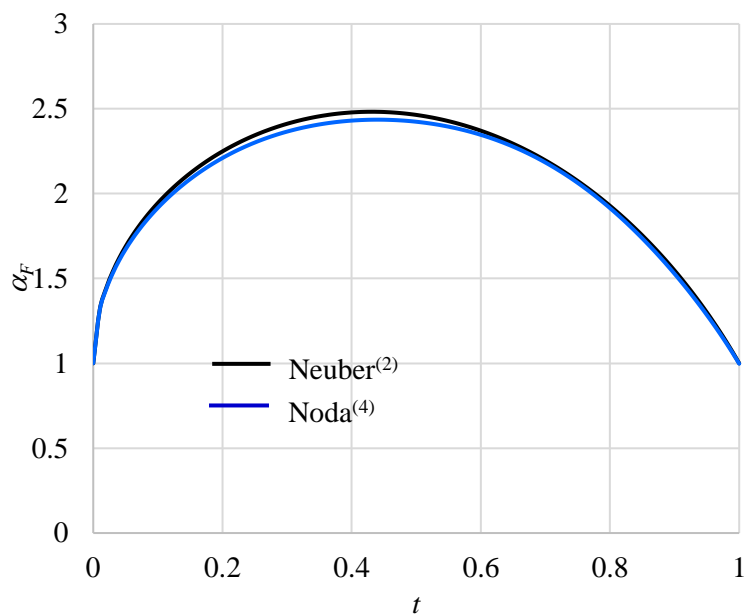


図 2-9 段付き深さ  $t$  を変化させたときの応力集中係数  $\alpha_F$  の変化



## 2.5 任意の切欠き形状における応力集中係数計算式

前節で任意の切欠き深さをもつ帯板の応力集中係数計算式は、ノイバーの三角則で求められることを説明したが、ノイバーの三角則は最大 10% 程度の誤差が生じるという問題がある。野田らは、体積力法を用いてノイバーの三角則を補正する式を提案し、誤差を 1% 以内とする計算式を提案している。この式は、精度が高いが、式が複雑であるとともに、適用範囲により複数の式を使い分ける必要があるなどの課題がある。そこで、本研究では、ノイバーの三角則を基に、FEM などの結果を基に、任意の切り欠き形状をもつ帯板の応力集中係数を求めることができる簡易な計算式を提案する。

任意の切欠き深さを有する帯板の応力集中係数は、ノイバーの三角則に基づき、浅い切欠きをもつ応力集中係数及び深い切欠きをもつ応力集中係数により、以下の式より求める。

$$\alpha_N = c + \frac{(\alpha_s - 1)(\alpha_d - 1)}{\sqrt{(\alpha_s - 1)^2 + (\alpha_d - 1)^2}} \quad (2.26)$$

$\alpha_N$ : 任意の切欠き深さを有する帯板の応力集中係数

$\alpha_s$ : 浅い切欠き深さを有する帯板の応力集中係数

$\alpha_d$ : 深い切欠き深さを有する帯板の応力集中係数

ただし、 $c$  は、FEM の結果に適合するように決定される係数である。

切り欠きの浅い応力集中係数の計算式について、等価楕円の考え方により得られる計算式は、式(2.13)に示す  $\sqrt{t/\rho}$  を変数項とする関数である。そこで、切り欠きの浅い応力集中係数は、 $\sqrt{t/\rho}$  の  $m$  次の多項式で近似可能とし、より精確な計算式を得るため、以下の式を提案する。

$$\alpha_s = c + \sum_{i=1}^m a_i \left( \sqrt{\frac{t}{\rho}} \right)^i \quad (2.27)$$

ただし、 $a_i$ ,  $c$  は、FEM の結果に適合するように決定される係数である。

他方、切り欠きの深い応力集中係数の計算式については、双曲線の切り欠きを持つ応力集中係数計算式が、式(2.12)に示す  $\sqrt{a/\rho}$  を変数項とする関数である。この式について、式(2.27)と同様に、 $\sqrt{a/\rho}$  の  $n$  次の多項式で近似可能とし、以下の式を提案する。

$$\alpha_d = c + \sum_{j=1}^n b_j \left( \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right)^j \quad (2.28)$$

ただし、 $c$ 、 $b_j$ は、FEMの結果に適合するように決定される係数である。

式(2.26)に式(2.27)及び式(2.28)を代入して、任意の形状の切欠きに対する応力集中係数 $\alpha_N$ を次のように表す。

$$\alpha_N = c + \frac{\sum_{i=1}^m a_i \left( \sqrt{\frac{t}{\rho}} \right)^i \sum_{j=1}^n b_j \left( \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right)^j}{\sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^m a_i \left( \sqrt{\frac{t}{\rho}} \right)^i \right\}^2 + \left\{ \sum_{j=1}^n b_j \left( \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right)^j \right\}^2}} \quad (2.29)$$

上式の精度を確認するため、V字切り欠きを有する帯板及びフィレット部を有する段付き平板について  $m=1$ 、 $n=2$  として野田らの計算式に一致するよう非線形カーブフィッティングにより係数を決定すると、応力集中係数計算式は以下のとおりとなる。

V字切欠き

$$\alpha_{N-CAL} = 1 + \frac{\left( 1.9412 \sqrt{\frac{t}{\rho}} \right) \left( 0.2767 \sqrt{\frac{a}{\rho}} + 0.3026 \frac{a}{\rho} \right)}{\sqrt{\left( 1.9412 \sqrt{\frac{t}{\rho}} \right)^2 + \left( 0.2767 \sqrt{\frac{a}{\rho}} + 0.3026 \frac{a}{\rho} \right)^2}} \quad (2.30)$$

段付き平板

$$\alpha_{N-CAL} = 1 + \frac{\left( 0.9208 \sqrt{\frac{t}{\rho}} \right) \left( 0.2659 \sqrt{\frac{a}{\rho}} + 0.2898 \frac{a}{\rho} \right)}{\sqrt{\left( 0.9208 \sqrt{\frac{t}{\rho}} \right)^2 + \left( 0.2659 \sqrt{\frac{a}{\rho}} + 0.2898 \frac{a}{\rho} \right)^2}} \quad (2.31)$$

図 2-10～2-11 に、 $b=1$ 、 $\rho=0.1$ としたとき、 $t$ を $\alpha_N$ については 0 から 1 まで、 $\alpha_F$ については 0.02 から 1 まで、変化させたときの野田らの計算式及び上式に示す計算式により求めた応力集中係数を示す。

提案した式は、適用範囲で野田らの式との誤差は 1%程度であり、よく一致している。

また、提案した式の係数は 3 個であり、野田らの補正式の係数 21 個に対して大幅に少なくなっており、簡易な計算式となっている。

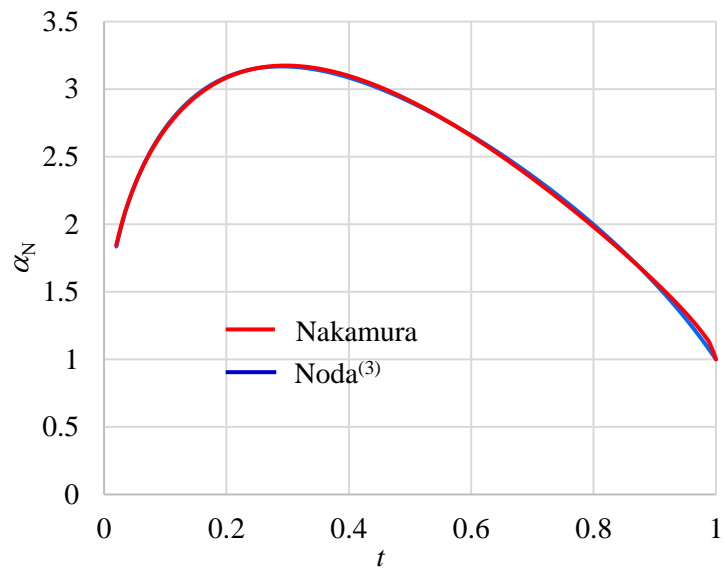


図 2-10 V 字切欠きを有する帯板の切欠き深さ  $t$  を変化させたときの応力集中係数変化

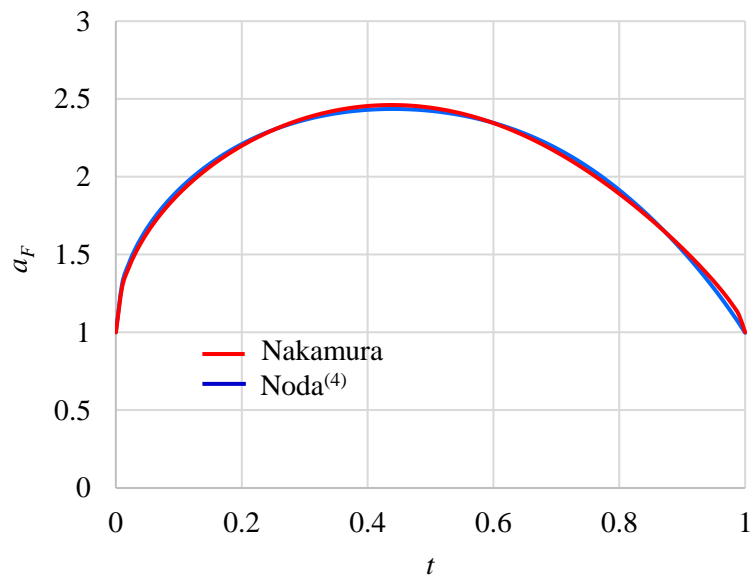


図 2-11 段付き部を有する帯板の段付き高さ  $t$  を変化させたときの応力集中係数変化

## 2.6 まとめ

2章では、継手の応力集中係数の算定に必要な応力集中係数の理論及び簡易な計算式の提案を行った。円孔、楕円孔、双曲線切り欠きを有する平板の応力集中係数については、厳密解が求められているが、本研究の対象とする継手形状を含む多くの形状については厳密解を求めることは困難である。ノイバーは、厳密解ではないが、任意の切り欠き深さを有する応力集中係数について、楕円孔、双曲線切り欠きの応力集中係数計算式を合成して求めるノイバーの三角則を提案している。ノイバーの三角則は、簡便な式のためこれまで広く用いられてきているが、最大 10%程度の誤差があり、より正確な式が求められている。野田らは、任意の切り欠き深さを有する平板について体積法を用いて、より正確な応力集中係数を求め、ノイバーの三角則を補正する式を求めている。野田らの式は、1%以内の誤差で精度よく応力集中係数を求めることができるが、式が複雑であるとともに、適用範囲により複数の式を使い分ける必要があるなどの課題がある。

そこで、本研究では、ノイバーの三角則を基に、FEM などの結果を基に、任意の切り欠き形状をもつ帯板の応力集中係数を求めることができる簡易な計算式を提案した。

提案式について、野田らの式に一致するよう非線形最小二乗法でカーブフィッティングした結果、野田らの式に対して 1%程度の誤差で一致し、精度よく応力集中係数を求めることができた。

また、提案した式の係数は 3 個であり、野田らの補正式の係数 21 個に対して大幅に少なくなっており、簡易な計算式となっている。

## 参考文献

- (1) 平野富士夫, 二次元弾性体の形状係数の研究(第 2 報), 日本機械学会論文集, Vo.16, No.55(1950), pp.52-58.
- (2) Neuber, H., Kerbspannungslehre, Springer-Verlag(1937), p.6
- (3) 野田尚昭, 世良政春, 高瀬康, 切欠きを有する段付丸棒および帯板試験片の応力集中係数の近似式, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.60, No.570(1994), pp.586-590.
- (4) 野田尚昭, 高瀬康, フィレット部を有する段付丸棒および段付平板の応力集中についての考察, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.62, No.595(1996), pp.787-793.
- (5) 村上敬宣, 応力集中係数の考え方(2005), p.85, 養賢堂.p1
- (6) 金崎俊彦, 永田晃市, 村上敬宣, 利用に便利な内孔周辺の応力分布の閉じた解析解とその応用(2005), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.71, No.711(2005), pp.1538-1544.
- (7) Neuber, H., Kerbspannungslehre, Springer-Verlag(1937), p.11

## 3章 一軸引張荷重下での継手応力解析

### 3.1 緒論

本章では、継手の引張強度向上に資するため、継手に一軸引張荷重が作用した時の応力解析を行い、継手部の応力分布、応力集中係数を求める手法について説明する。なお、本研究では応力集中係数について、継手強度評価の利便性のため、部材の幅全体の断面の平均応力と最大主応力との比を「継手応力集中係数」として定義している。応力解析は、継ぎ手の引張試験を行い、試験中の継手部のひずみ分布を DIC により測定し、応力分布を求める実験的手法、継手部を接触領域とする FEM による接触弾性解析により応力分布を求める数値計算手法の 2 つの手法で行い、両者の解析結果を比較検討することで、解析の妥当性を確認する。さらに、解析対象とする継手の寸法パラメータを変化させたときの応力集中係数を FEM により求め、継手の寸法パラメータと応力集中係数の関係を求める。そのうえで、2 章で提案した応力集中係数計算式を基に任意の継手寸法パラメータから鎌継手の応力集中係数を求める計算式を提案し、FEM の結果に適合するよう計算式の係数を非線形最小二乗法により決定する。さらに、提案した計算式から応力集中係数を最小とする形状を求める。

### 3.2 継手モデル

#### 3.2.1 本研究での継手モデル

図 3-1 に示す鎌継手の形状は、 $z$  軸方向半分のみで軸荷重を伝達することから、簡単のため、図 3-2 に示すような 2 次元構造の鎌継手とする。鎌継手形状の寸法パラメータは、試験片幅  $2W$ 、鎌首部幅  $2D$ 、鎌あご部付け根及び先端のフィレット半径  $R$ 、鎌頭部長さ  $L$ 、鎌あご部幅  $S$ 、厚さ  $T$  で表す。ここで、試験片鎌頭部長さ  $L$ 、鎌首長さ  $D$ 、鎌あご幅  $S$ 、フィレット半径  $R$  を試験片幅  $W$  で除して、無次元化した寸法パラメータ  $L^*=L/W$ 、 $D^*=D/W$ 、 $S^*=S/W$ 、 $R^*=R/W$  を導入する。

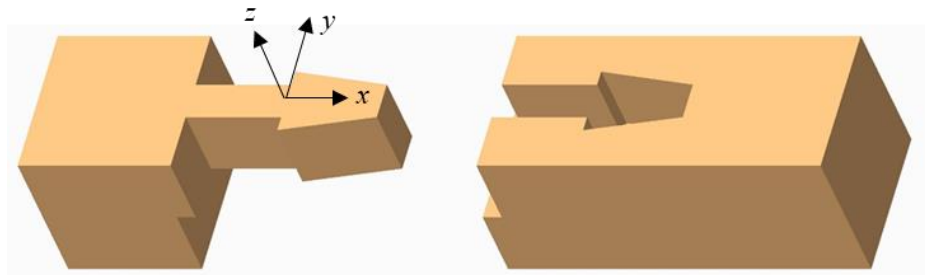


図 3-1 腰掛け鎌継ぎ

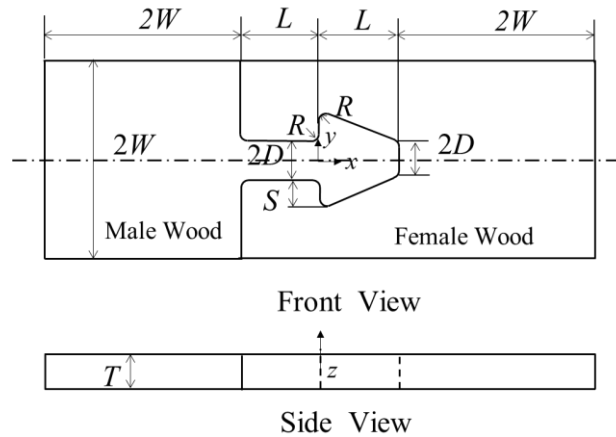


図 3-2 鎌継手の寸法

試験片は，伝統的に決定された形状および  $L$  ,  $D$  ,  $S$  ,  $R$  を変化させた形状とする．また，鎌首長さと鎌頭部長さ  $L$  を同じ長さとしている．これは，鎌頭部長さと鎌首長さは，経験的に決められた寸法では同じ長さであり，さらに，鎌首長さが鎌頭部長さ以上であれば，男木部，女木部の応力集中係数に与える影響が少ないと考えられるためである．

### 3.2.2 継手の材質

木造建築に使用される構造材は，無垢材または木板を積層状に接着した集成材が用いられる．木材は，繊維方向，年輪の半径方向，接線方向で力学的性質が異なる直交異方性材料<sup>(1)</sup>であることや，年輪や節などの存在により材質が不均質なため力学的挙動の解析は複雑となる．一方，中密度繊維板 (MDF) のような合成木材は等方性材料と考えられる．このため，はじめに，解析が容易である等方性材料の継手試験片で応力解析を行い，両解析の妥当性を評価する．その上で，木材の継手試験片で解析を行うものとする．

等方性材料の材質は，縦弾性係数，引張強度が木材の繊維方向の値に近いアクリル材および木材の繊維を圧縮成型した中密度繊維板を用いている．木材は，明瞭な年輪がなく欠陥が少ないアガチス材を用いている．各材質の特徴は以下の通りである．

#### (1) 等方性材料

##### ア アクリル材

アクリル樹脂は，アクリル酸エステルあるいはメタクリル酸エステルの重合体で，透明性の高い非晶質の合成樹脂である．特にポリメタクリル酸メチル樹脂 (Polymethyl methacrylate)。略称 PMMA) による透明固体材はアクリルガラスとも呼ばれる．また，ポリカーボネートなどと共に有機ガラスとも呼ばれる．

表 3-1 JIS に規定された MDF の品質 (JIS A 5905-2003)

種類	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	含水率 [%]	曲げ強さ [N/mm <sup>2</sup> ]	湿潤時 曲げ強さ [N/mm <sup>2</sup> ]	吸水厚さ 膨張率 [%]	剥離強さ [N/mm <sup>2</sup> ]	木ねじ 保持力 [N]
30 タイ プ	0.35 以上	5 以上 13 以下	30.0 以上	15.0 以上	厚さ7mm 以下のもの 17 以下	0.5 以上	500 以下

## イ 中密度繊維板 (MDF)

木材及びその他の植物繊維を主な原料として成形した板状製品をファイバーボードという。ファイバーボードはその密度・製法により、インシュレーションボード・MDF・ハードボードの3つに大別される。MDF (medium density fiber board) は、ドライプロセス (乾式法) によって接着剤を用いて製造される。JIS A 5905 では、インシュレーションボードは密度 0.35g/cm<sup>3</sup> 未満、ハードボードは 0.80g/cm<sup>3</sup> 以上とされ、MDF は密度 0.35g/cm<sup>3</sup> 以上でドライプロセスによるものと規定されている。

### ① 性質

熱圧縮による厚さ方向の密度勾配があるものの、ファイバーをエレメントとしているため材質が緻密で、均質である。そのため機械加工性も良く、彫刻加工や曲面加工も可能で、表面の平滑性にも優れており塗装、プリント、オーバーレイの基材に向いている。また、釘接合や木ねじ保持力にも優れており、吸水厚さ膨張率もパーティクルボードに比べ優れている。JIS に規定された MDF の品質を表 3-1 に示す。

### ② 強度性能

MDF の曲げ強さ、曲げヤング率は接着剤の種類によらず、ボード密度に比例して高くなる。また、それらは接着剤の添加量にも依存し、添加量が多いほどそれらの性能は高くなるが、その傾きは接着剤の種類により多少異なる。MDF を製造する場合には表層近くの密度が高くなり、心層の密度がそれに比べて低くなる。その密度勾配が高いほど一般に曲げ強さ、曲げヤング率は高くなり、剥離強さは逆に低くなる。

## (2) 直交異方性材料 (木材)

樹木は幹軸 (幹)、枝及び根に区分され、木材として利用の対象になるのは主に幹である。幹の大部分は木部で、その外周を樹皮が包んでいる。図 3-3 に示すように、木部の中心には髄があり、それを取り巻く同心円状の年輪がある。この年輪に対して半径方向 (放射方向)、接線方向、これらに直交する繊維方向をそれぞれ半径 (R) 軸、接線 (T) 軸、幹 (L) 軸とする。これらを構造 3 軸と呼ぶ。また、幹軸と接線方

向または半径軸を含む断面をそれぞれ板目 (LR) 面, 柁目 (LT) 面, 接線軸と半径軸を含む幹軸の横断面を木口 (RT) 面という.

#### ア 年輪

1 生長周期に形成される木部の層が生長輪である. 四季が見られる地域に生育した樹木はその周期が1年であり, この場合の生長輪が年輪である. 1年に2つ以上の年輪形状の層を持つものを重年輪, そのうち年輪以外の層を偽年輪と呼ぶ. 偽年輪はしばしば外縁が不明瞭, 不連続生長輪になる場合が多く, この年輪幅は狭い.

年輪には早材と晩材がある. 前者は生長期の初めに形成されるので春材, 后者は後半に形成されるので秋材とも呼ばれる. 図3-4に示すように, 早材は春夏の木材の成長速度が速いため細胞密度が低く密度が小さく硬い. 一方, 晩材は秋冬の木材の成長が遅いため細胞密度が高く密度が大きく柔らかい. また, 早材から晩材への移行部の年輪界は明確である一方, 晩材から早材の区分は不明確である. 針葉樹では色調, 細胞形状, 硬さ, 密度などで区分する.

#### イ 辺材と心材

図3-3に示すように, 辺材は木部の外周部に存在し, その色調は淡色で, 根から吸収した養分を上方へ導いているため, 生材含水率が高い. 心材はその内側にあり, 一般には濃色で, その生材含水率が低い. しかし, 広葉樹のうち樹種によっては心材の生材含水率が辺材のそれよりも高い, 多湿心材を持つものがある. また, 辺材と心材には移行材があり, これは一般に年輪幅が狭い部分で, しばしば白色を示すことから白線帯とも呼ばれる. 有色心材には, 黒, 紫, 褐, 赤, 黄色系などの色調のものがあるが, 樹種によっては成木の樹心部でも着色していない淡色心材がある. また, このような材が外傷などによって心材化と類似して樹心部が濃色になり, 偽心材となることがある. 一般に, 心材は辺材よりも耐久性や材色などから, 利用価値が高い.

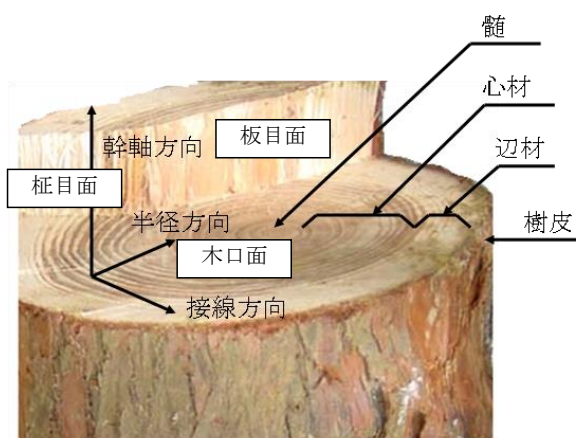


図 3-3 木材の構成



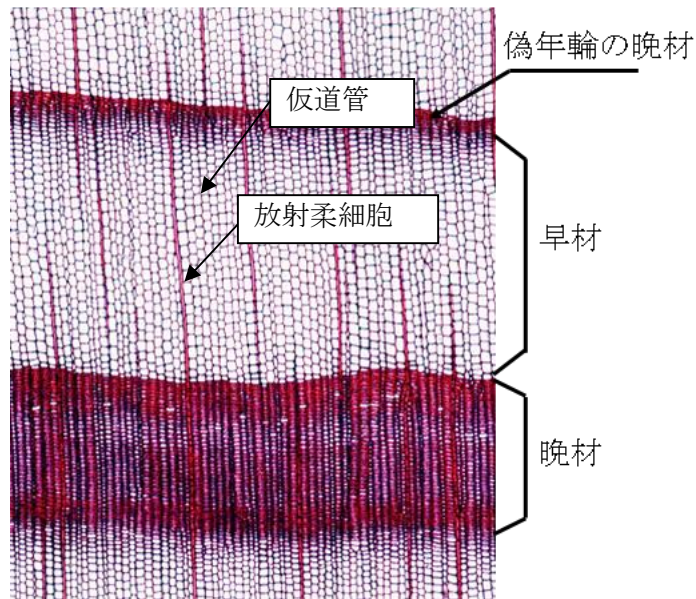


図 3-4 木口面の細胞配列



(a) 生節

(b) 死節

図 3-5 木材の節

### ウ 木材の欠点

木材の利用上材料的な価値を低下させる組織，形態，傷などが欠点である。樹木の生育過程で現れる主なものを次に掲げる。

#### ① 節

樹幹内部に残った枝が節である。節は一般的には化粧的な価値を低下させ，強度を低減させる。図 3-5 に示すように節と周囲の組織が連結されているものが生節，両者のつながりがないものが死節，また腐朽しているものが腐れ節である。

また製材面に現れた節はその形や形状によって丸節，流れ節，葉節など様々な呼び名がある。

## ② あて材

傾斜した樹木が偏心生長して直立しようとするとき、肥大生長が促進された材が当て材であり、これには圧縮あて材と引張あて材がある。前者は針葉樹の傾斜した幹の下側に、後者は広葉樹の傾斜した幹の上側に形成される。あて材はいずれも幹軸方向に異常に収縮し、用材の曲がりや割れを引き起こし、その価値を低下させる。圧縮あて材は細胞の横断面が円形で、細胞壁が厚く、細胞間隙が多い。引張あて材には二次壁最内部にゼラチン層をもつ、いわゆるゼラチン繊維が存在する。圧縮あて材は肉眼的に判別することが容易であるが、引張あて材は困難である。しかし、生材時に鋸段するとゼラチン層が毛羽立ち、その絹糸状光沢によって判別できる。

## ③ 未成熟材

未成熟剤の形状層によって作られた木部が未成熟材である。仮道管長は樹心からの年輪数とともに増加するが、その増加率は外方へ向かって減少し、約 10 から 15 年輪ではほぼ一定となる。この範囲までが未成熟材部で、皮熟材部に比べて材質、特に力学的性質が劣る。針葉樹の比重や強度の樹幹内変動が大きい樹種では未成熟材が特に低質であり、また初期生長がよいものほど未成熟材の比率が高くなる。

## ④ 強度特性

木材は、引張に対しては脆性を示し、弾性域を超えると亀裂が発生し、その後、亀裂は急激に進展し破断する。金属等の延性材料は、引張荷重を加えると、弾性域を超えた降伏後も塑性変形し、荷重に対して材料の連続性を保持して破断に至る。

建築物の構造材への要求項目として弾性域での強度とともに、耐震性が重要である。耐震性とは、震災時に、降伏→塑性→破壊の過程で如何に地震エネルギーを吸収し、地震により建築物が倒壊せず居住区間を確保するかが重要となる。木材は、引張に対して脆性を示し、延性材料を用いている鉄骨などに比べ、降伏後のエネルギー吸収量が少ないため、一般的に耐震性で劣ると考えられる。

本研究で用いるアガチス(*Agathis* spp.)とは、南洋材のナンヨウスギ科、ナギモドキ属の常緑針葉樹である。約 10 種がマレー半島～ニューギニア、オーストラリア北部、ニュージーランド、フィジーに分布し、通直、円筒状の樹幹をもち、葉は楕円形。材は辺心材の差が少ない淡黄白色～淡黄褐色～淡褐色。熱帯樹なので年輪はないが、ときに成長輪に沿って褐色の筋が入る。気乾密度は 0.51 (0.36~0.64) [g(cm)<sup>3</sup>]<sup>2)</sup>。加工は容易だが、あての多いものは乾燥時にそり、割れを生ずる。耐久性は小～中。建築（造作、建具、ドア）、家具内部用材などに用いられる。アガチスの肌目を図 3-6 に示す。



図 3-6 アガチス材の肌目

## 3.3 解析方法

### 3.3.1 DIC 解析

DIC では、鎌継手試験片の引張試験を行い、引張荷重負荷前後の画像によりひずみ分布を測定する。DIC に使用する試験片は、ひずみ分布を観測するため試験片表面をラッカースプレーによりランダムパターンを付与する。引張試験は、万能引張試験機を用い、男木部、女木部の端部を空圧式つかみ具で固定し、クロスヘッドを上昇させ引張力を作用させる。無負荷時および試験片に既定の試験荷重が作用した時にクロスヘッドを停止し、デジタルカメラで撮影し、DIC の入力画像を得ている。応力分布は、平面応力状態と考え、DIC により測定されるひずみ成分より、材料の構成式を用いて求める。

#### 3.3.1.1 DIC の原理

画像相関法 (Digital image correlation method: DIC) とは、測定対象表面にスペックルパターンと呼ばれるランダムな模様を塗布し、カメラで撮影したデジタル画像を数値解析することにより、計測範囲全体の変位・ひずみ分布やその方向を非接触・高精度に求めることができる手法である。測定に際しては、対象物の画像を撮影するのみという簡易な手法であること、計測システムは PC とカメラのみと簡易であるため持ち運びや計測のセッティングが容易なことも特徴の一つである。

DIC を行う際に重要になるのが、任意の点の移動量の算出である。解析原理は、デジタル画像が一般的に 256 階調で表現される画像であることを利用したものである。まず、変形前の画像において、任意の点(1 画素)を中心とした  $N \times N$  画素の任意領域 (サブセット) を指定する。計測対象物に変位を与えると、変形後の画像でのサブセットの位置は変化する。変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度値分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索する。このサブセット中心の点の移動より変位方向、変位量を算出する。この処理を全ての小領域で繰り返す事によって、全視野の変位データが得ることができる。ひずみ分布は、以上の方法により得た変形量を利用して算出する。これは、あらかじめ求めたい点を中心として、ある画素数だけ離れた点の変位を基に、変形後の二点間の長さの変化を求め、計測点のひずみとする解析手法である。この解析手法の特長として、水平、垂直、斜め、最大・最小主ひずみの値と方向を求めることが可能であること、任意に解析点の距離を変えること、すなわちゲージ長の自由な選択が可能となること、などが挙げられる。

変形前後の画像間における相関を求める方法として、1 画素単位の計測精度で変位量を求める粗探査と、1 画素以下の精度で変位量を求める精密探査が存在する。粗探査の一例として、残差最小法を利用した算出方法を式(3.1)に示す<sup>3)</sup>。

$$(X + u, Y + v) = \sum_{i=-M}^N \sum_{j=-M}^N |I_d(X + u + i, Y + v + j) - I_u(X + i, Y + j)| \quad (3.1)$$

ここで、同式中の  $I_u(X, Y)$ ,  $I_d(X+u, Y+v)$  は、それぞれ変形前、変形後の輝度値を示す。 $X, Y$  は、サブセットの中心座標を表す。 $u, v$  は、それぞれ  $x$  方向、 $y$  方向への移動量を示す。 $N=2M+1$  である。式(3.1)の値が最小となる位置は、設定したサブセットの移動後における中心位置(最近接画素)と考えられる。

しかしながら、前述の通り、実際の移動量は最近接画像と一致することは稀であり、ほとんどの場合は、1画素単位以下の微小な変位をとるものである。そこで、粗探索後に、1画素以下の精度で移動量を求める精密探索を行う。これらの探索例として、最近接画素周辺の画素点での相関値を利用する方法や、離散的な画素の強度値の間に対して直接的に数値補間を導入し、相関が最も良い位置を求める方法がある。前者は、相関の最も高い画素位置とその周辺部の画素位置での相関値について、1次曲線や2次曲線、ガウス分布の直線、曲線などを利用して補間し、その交点やピークをもとに1画素以下の移動量を求めるものである。一方、後者は、計測した画像の離散的な強度分布を直接、線形や2次曲線、Bi-cubic等の補間関数を用いて補間、相関関数を演算し、相関の最も良い位置を求めるものである。

### 3.3.1.2 引張試験

#### (1) 試験片

鎌継手の試験片は、継手モデルを3DCADソフト(creo3.0 PTC社)で作成の上、3次元加工機(Roland MDX 540)で継手形状を加工する。なお、アガチス材は継手正面が、柎目面(LT面)となっている。さらに、DICに必要なランダムパターンについては、試験片表面を黒色のスプレーで下地処理し、処理し、その上にエアブラシにより微細なランダムパターンを付与する。図3-7には、ランダムパターンを付与した鎌継手試験片を示す。



図 3-7 ランダムパターンを付与した試験片 (アガチス材)

継手寸法は、伝統的に決定された継手寸法を参考とし、表 3-2 に示すとおりとする。

(2) 試験装置

試験装置は継手に引張荷重を加える引張試験機及び DIC 装置からなる。図 3-8 に試験装置一式の写真を示す。

表 3-2 鎌継手試験片寸法

単位[mm]

$W$	$L$ ( $L^*$ )	$D$ ( $D^*$ )	$S$ ( $S^*$ )	$R$ ( $R^*$ )	$T$ ( $T^*$ )
20	25 (1.25)	10 (0.5)	4 (0.2)	1 (0.1)	Acrylic:2(0.1) MDF: 4(0.2) Agathis:3 (0.15)

\* (カッコ内は、試験片幅  $W$  で除し無次元化したパラメータ)

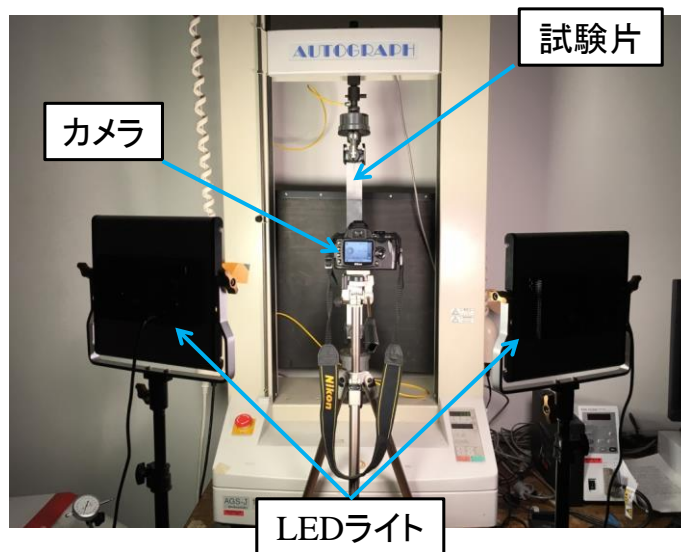


図 3-8 試験の様子

表 3-3 汎用引張試験機の仕様

定格負荷容量		10kN
試験速度	速度範囲	0.5mm～500 mm/min
	設定分解能	1mm/min
		±0.5%
計測	ロードセル容量	1kN
	サンプリング速度	50 msec
	測定分解能	1/50000
	測定精度	表示値の±1%
メーカー・型番		(株) 島津製作所 AGS-J

表 3-4 DIC 解析装置の仕様

デジタルカメラ	メーカー・型番		ニコン D40X
	レンズ		シグマ光機 18-300mm F3.5-6.3 (クローズアップレンズ装着)
	設定	F 値	10
		シャッタースピード	1/2 s
LED 照明	メーカー・型番		NEEWER NL480
	台数		2 台
DIC 解析ソフト	ソフト名		Ncorr(ver.2.1)
	設定	サブセット半径	30pixel
		サブセット間隔	2pixel
		ひずみ半径	3pixel

#### ア 引張試験機

引張試験に使用する汎用引張試験機（島津製作所 AGS-J）の仕様を表 3-3 のとおりである。

#### イ DIC 解析装置

DIC 試験装置は、デジタルカメラ及びマクロレンズ、LED 照明装置、DIC 解析装置から構成される。機器の主な仕様は表 3-4 に示すとおりである。カメラのシャッタースピードは、出水ら<sup>4)</sup>を参考に 1/2s に設定している。また、マクロレンズにクローズアップレンズを装着することで、一定の撮影距離(800mm)を確保しつつ解像度が小さくしている。このとき、画像解像度は、約 0.022mm/pixel となる。撮影距離が長くなることで引張試験中の試験片の撮影方向の変位によるひずみ測定誤差が小さくなる<sup>5)</sup>。さらに、解像度が大きくなることでより微細なひずみ分布を測定することができ

る。DIC は、MATLAB で動作する 2 次元 DIC 解析ソフト Ncorr (Ver.2.1) <sup>(6)</sup>を用いている。サブセット半径は 30pixel, サブセット間隔は 3pixel, ひずみ半径を 3pixel に設定している。

### 3.3.1.3 試験手順

試験手順は、図 3-9 に示す手順で行う。

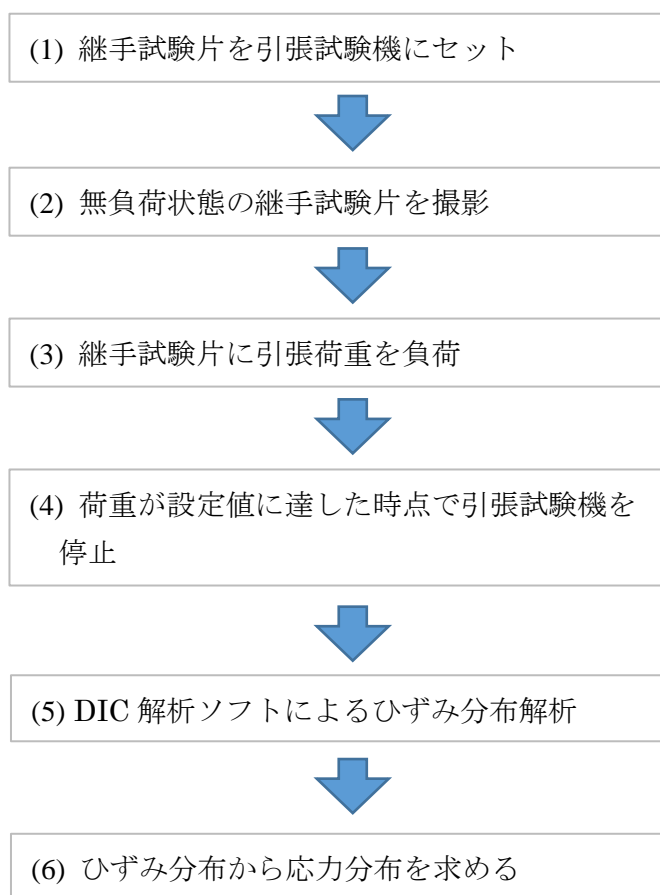


図 3-9 DIC による解析手順



#### (1) 継手試験片のセット

作成した継手試験片を引張試験機にセットする。継手試験片は空圧式つかみ具（エアチャック）により固定する。このとき、継手試験片は、曲げが生じないように引張方向に平行かつ継手試験片の中心がつかみ具軸心に一致するように固定する。

#### (2) 無負荷状態の継手試験片撮影

無負荷状態の継手試験片の画像を撮影する。試験片表面のランダムパターンがシャープに写るようデジタルカメラのピントを合わせる。さらに、ランダムパターンの濃淡が明瞭なるように LED 照明の明るさを調整する。継手試験片の撮影は、デジタルカメラに接続したパソコンによる遠隔操作で行う。遠隔操作で行うことでカメラ本体に触れることなく撮影ができ、手振れ等による画像のブレを防ぐことができる。

#### (3) 継手試験片への荷重負荷

引張試験機のクロスヘッドを上昇させ、継手試験片に引張荷重を加える。

#### (4) 引張荷重負荷時の継手試験片撮影

引張試験機の荷重値が設定値に達したところで、引張試験機のクロスヘッドを停止し、荷重を一定値に保持する。荷重設定値は、アクリル試験片 100N、MDF 試験片及びアガチス材は 200N としている。クロスヘッド停止後、無負荷状態と同様の条件で撮影する。デジタルカメラにより撮影した画像は、イメージセンサーによる処理、撮影時のカメラの振動等によるノイズが混在し、これらのノイズが DIC 解析時の誤差の要因となる<sup>(4)</sup>。特にアガチス材は、引張方向のヤング率が大きく試験荷重を負荷したときのひずみ量に対してノイズによる誤差が大きくなる。そこで、アガチス材については、画像を 3 枚連続撮影する。これは、3 枚の画像についてそれぞれ DIC を行い、得られたひずみ分布を加算平均処理することで画像のノイズによる誤差を減少させるためである。

#### (5) 画像相関法解析によるひずみ分布解析

画像相関法解析ソフト Nccor により、継手試験片のひずみ分布を解析する。解析手順は、以下のとおりである。

##### ①解析画像の読み込み

無負荷時の画像をリファレンス画像、荷重負荷時の画像（アクリル材、MDF：1 枚、アガチス材：3 枚）をカレント画像として画像を読み込む。

##### ②解析範囲の設定

ひずみ分布の解析範囲を男木部、女木部で設定する。これは、継手部全体で設定すると継手部が連続した材料とみなされ解析されるため、継手部材間の接触部変位もひずみとして計算され正しくひずみ分布が解析されないためである。

##### ③解析パラメータの設定

画像相関法の解析に必要な解析パラメータを設定する。既往の研究を参考に、画像相関解析を行う際のランダムパターンの範囲の決めるサブセット半径は 30pixel、

ひずみ分布の分解能であるサブセット間隔は 2pixel に設定している。

#### ④解析の実施

画像相関解析を開始する。画像相関解析に当たっては、解析領域をパソコン CPU のコア数分に分割して解析することで解析時間を短縮することができる。

#### ⑤ひずみ分布解析

画像相関解析から求めた継手試験片内の変位分布から各成分のひずみ分布を求める。ひずみ分布解析にあたっては、各点のひずみを計算する際に使用する変位データの領域を決定するひずみ半径は 3 に設定する。

アガチス材については、3 つのカレント画像より 3 組のひずみ分布が得られる。3 組のひずみ分布から加算平均処理したひずみ分布を得る。

#### (6) 応力分布解析

(5)で求めた平均加算処理したひずみ分布から各応力分布を材料の構成式により計算する。等方性材料、直交異方性材料の構成式は以下のとおりである。

等方性材料

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} \{\varepsilon_x - \nu\varepsilon_y\} \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} \{\varepsilon_y - \nu\varepsilon_x\} \\ \tau_{xy} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy}\end{aligned}\tag{3.2}$$

異方性材料

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} \{\varepsilon_x - \nu_{yx}\varepsilon_y\} \\ \sigma_y &= \frac{E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} \{\varepsilon_y - \nu_{xy}\varepsilon_x\} \\ \tau_{xy} &= G_{xy}\gamma_{xy}\end{aligned}\tag{3.3}$$

各試験片材料の材料定数を、表 3-5 に示す。アクリル及び MDF の材料定数は、引張試験を行い、2 方向ひずみゲージより  $E$  及び  $\nu$  を求めている。

アガチス材については、縦弾性係数は高橋らが実験より求めた値<sup>(7)</sup>、ポアソン比は澤田が求めた針葉樹林の平均的な値を採用している<sup>(8)</sup>。

$$\frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L}\tag{3.4}$$

表 3-5 試験片材の材料定数

	E[GPa]			$\nu$	
アクリル	3.2			0.39	
MDF	4.08			0.34	
	$E_L$ [GPa]	$E_T$ [GPa]	$G_{LT}$ [GPa]	$\nu_{LT}$	$\nu_{TL}$
アガチス	14.2	0.36	0.73	0.50	0.013

上式に、 $E_L$ 、 $E_T$ 、 $\nu_{LT}$ を代入して $\nu_{TL}$ を求めている。

アガチス材については、応力分布の加算平均をとり、試験片のひずみ分布、応力分布を算出する。

### 3.3.2 FEM 解析による応力解析

FEM では、平面応力問題として、男木部と女木部を嵌め合うようモデルを作成し、継手部を接触領域として接触弾性解析を行っている。解析コードは、ANSYS を用いている。

#### 3.3.2.1 解析モデル

引張荷重を受ける鎌継手の解析モデルを図 3-10 に示す。

モデルの境界条件は男木端部について  $x$  軸方向の変位を拘束し、女木端部に引張試験の試験荷重に相当する引張応力（アクリル試験片、MDF 試験片：1.25MPa、アガチス試験片：1.67MPa）を与える。また、鎌継手形状は、引張試験については引張方向( $x$  軸)方向に対称なため、計算量を減らすため、継手の上半分をモデル化している。応力集中部の応力分布を精度よく求めるため、男木と女木がかみ合うあご部について部分領域を設けて、要素寸法を細かくしている（図 3-11）。この領域のメッシュ寸法は、最大応力が生じる男木の鎌あご部根元のフィレット部及び女木鎌あご部先端のフィレット部についてはフィレット半径の 1/100 としている。

メッシュ生成後、男木と女木の継手部は、接触領域として扱い、接触部の摩擦は文献値の無いアクリル材、MDF 材は無視し、アガチス材については、文献値より静止摩擦係数を 0.5 としている<sup>9)</sup>。

はじめに、引張試験と同寸法の従来形状の寸法の継手モデルで解析を行い、妥当性を確認する。次に、各寸法パラメータを変化させ FEM を行ない、寸法パラメータと継手応力集中係数の関係を明らかにする。

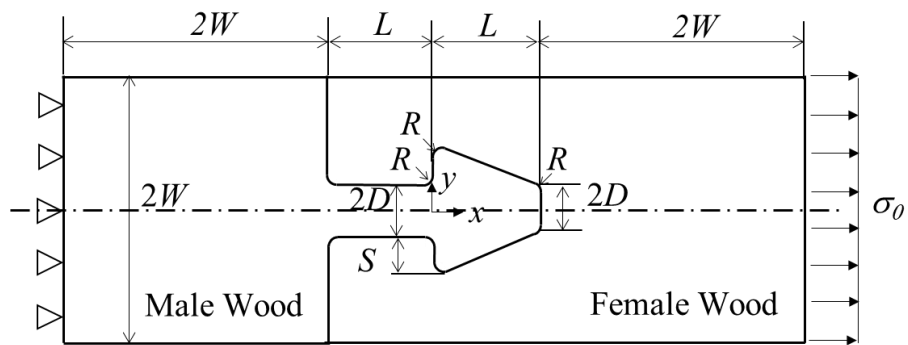


図 3-10 鎌継手 FEM モデル

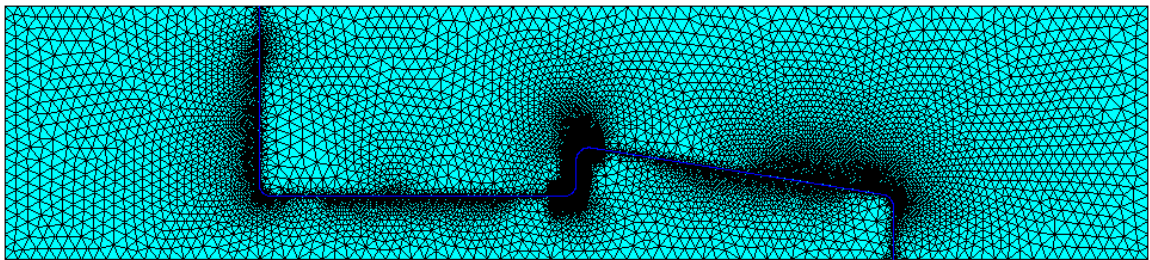


図 3-11 鎌継手 FEM モデル (メッシュ生成後)

### 3.3.2.2 解析手順

解析手順を図 3-12 に示す.

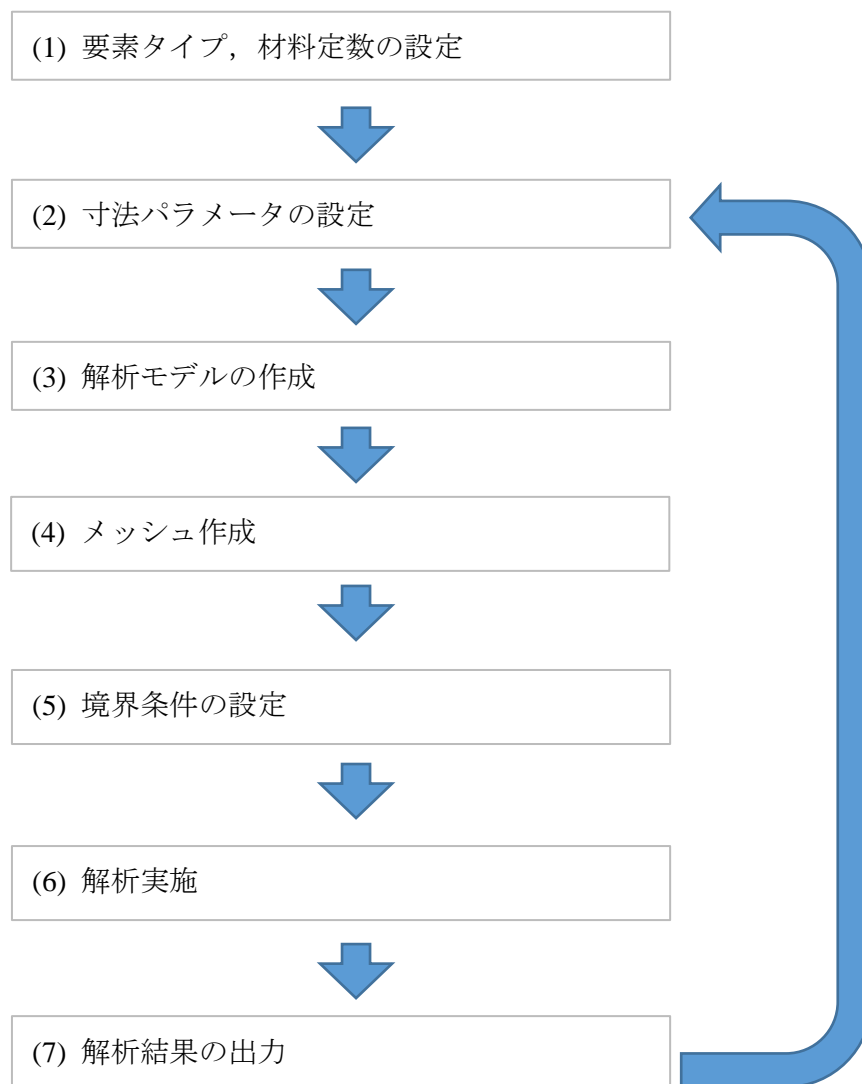


図 3-12 FEM による解析手順

- (1) 要素タイプは PLANE183 を選択する。PLANE183 は、6 節点(三角要素)または 8 節点 (四角要素) を持つ平面要素である。要素内の節点は x 方向, y 方向の 2 方向の自由度をもつ。この要素は、不規則な形状のメッシュ形状に適合する。試験片に用いる材質の材料定数を入力する。
- (2) 継手の寸法パラメータを入力する。
- (3) 解析モデルを作成する。解析モデルの作成に当たって、応力集中部のエリアについては、応力分布を正確に求めるため、他のエリアと分割してエリアを作成する。
- (4) 解析モデルのメッシュを生成する。応力集中部のメッシュ寸法は、既往の研究および筆者が行った予備解析 (付録参照) を基に、要素寸法の 1/100 としている。
- (5) 継手モデルの変位拘束及び荷重負荷を継手試験片の試験条件と同等となるよう設定する。また、継手試験片の両部材が接触する部分は、接触エリアとして設定する。なお、接触エリアの摩擦はアクリル材, MDF は無視し、アガチス材は 0.5 としている。
- (6) 解析を実行する。
- (7) 解析実施後、継手試験片の部材別のひずみ、応力成分のコンター図を作成する。また、応力集中部の各応力成分及び主応力の最大値を出力する。
- (8) 寸法パラメータと応力集中係数の関係を求めるため、(2)から(7)の手順を、寸法パラメータを段階的に変化させて解析を行う。この繰り返し手順は、寸法パラメータの範囲、ステップ値を予め設定し、自動的に行われる。

### 3.4 解析結果

#### 3.4.1 等方性材料

##### (1) アクリル試験片

DIC 及び FEM により求めたアクリル試験片の男木部及び女木部の  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\gamma$  の分布を 図 3-13~3-15 に示す. 各ひずみ成分の分布において, DIC と FEM の結果はよく一致している. 図 3-13 に示す  $x$  軸方向のひずみ分布をみると, 男木と女木のあご部は, 引張荷重を受けるときに生じる接触応力により, 圧縮ひずみが生じている. 男木については, 引張荷重により鎌首部に引張が生じている. 女木については, 引張荷重により鎌頭部両側面に引張ひずみ生じている. また, 引張荷重が作用することにより継手部が幅方向に開くため, 継手部上下で圧縮ひずみが生じている. 最大ひずみが生じている箇所は, 男木部は鎌あご部根元, 女木部は鎌あご先端部である.

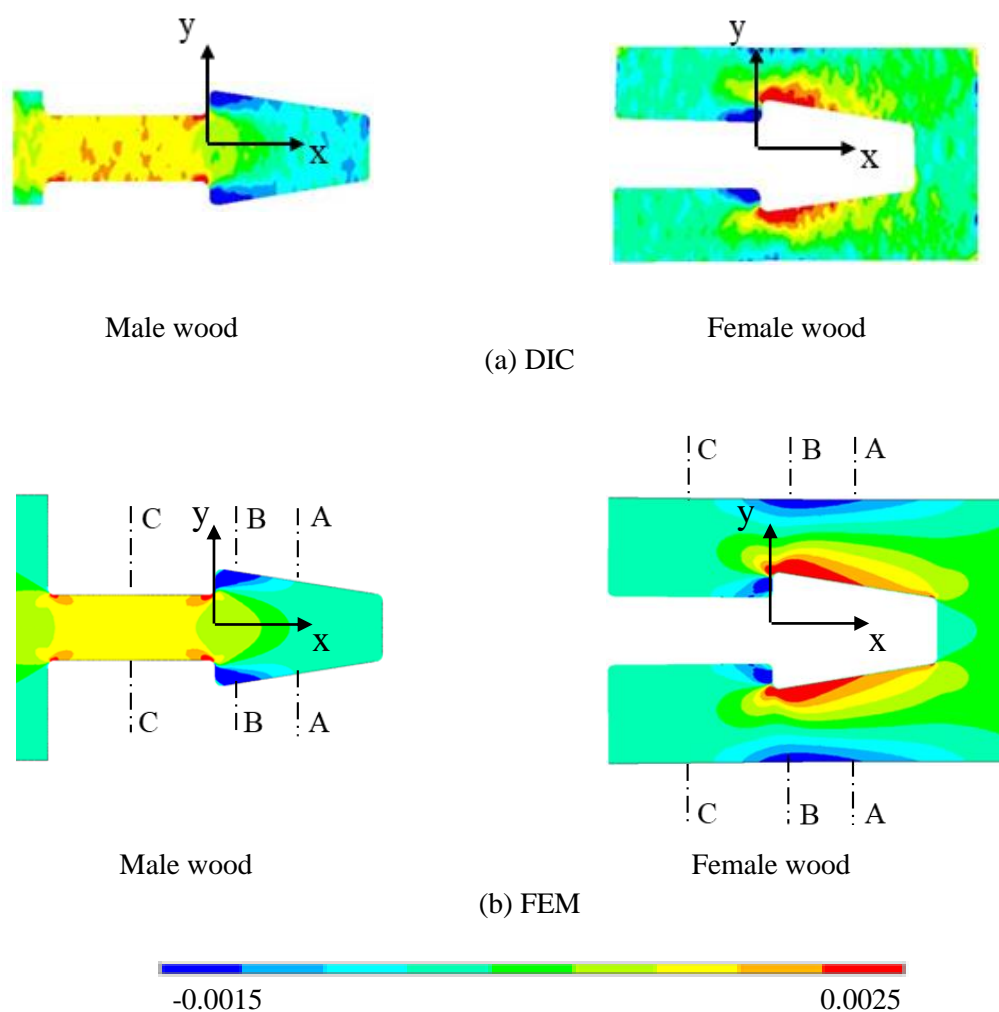
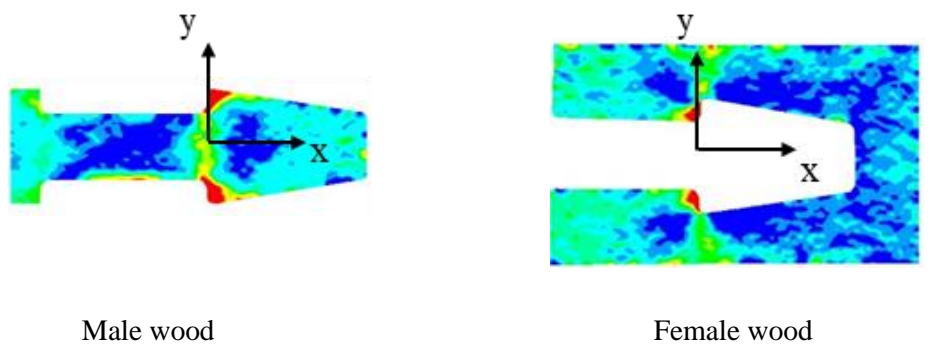
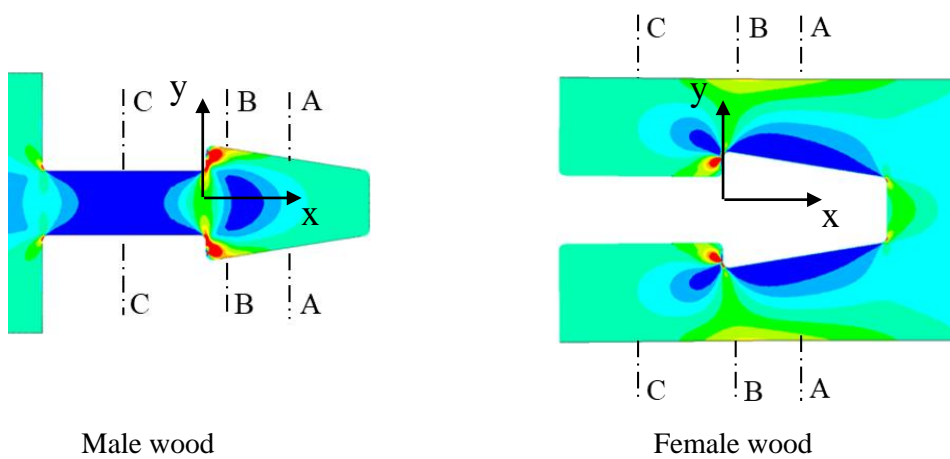


図 3-13  $x$  方向垂直ひずみ $\epsilon_x$ の分布 (アクリル試験片)

図3-14に示す  $y$  軸方向のひずみ分布  $\varepsilon_y$  をみると、男木と女木のあご部は、引張荷重を受けるときに生じる接触圧力により、引張の横ひずみが生じている。男木については、引張荷重により引張荷重が生じている。女木についても、引張荷重により鎌頭部両側面に圧縮の横ひずみ生じている。



(a) DIC



(b) FEM



図 3-14  $y$  方向垂直ひずみ  $\varepsilon_y$  の分布 (アクリル試験片)



図 3-15 に示すせん断ひずみ分布をみると、男木、女木ともに、継手部のフィレット  
 フィレット部でせん断ひずみが生じている。最大せん断ひずみは、男木は、鎌あご部根  
 元、女木は、鎌あご部先端で生じている。

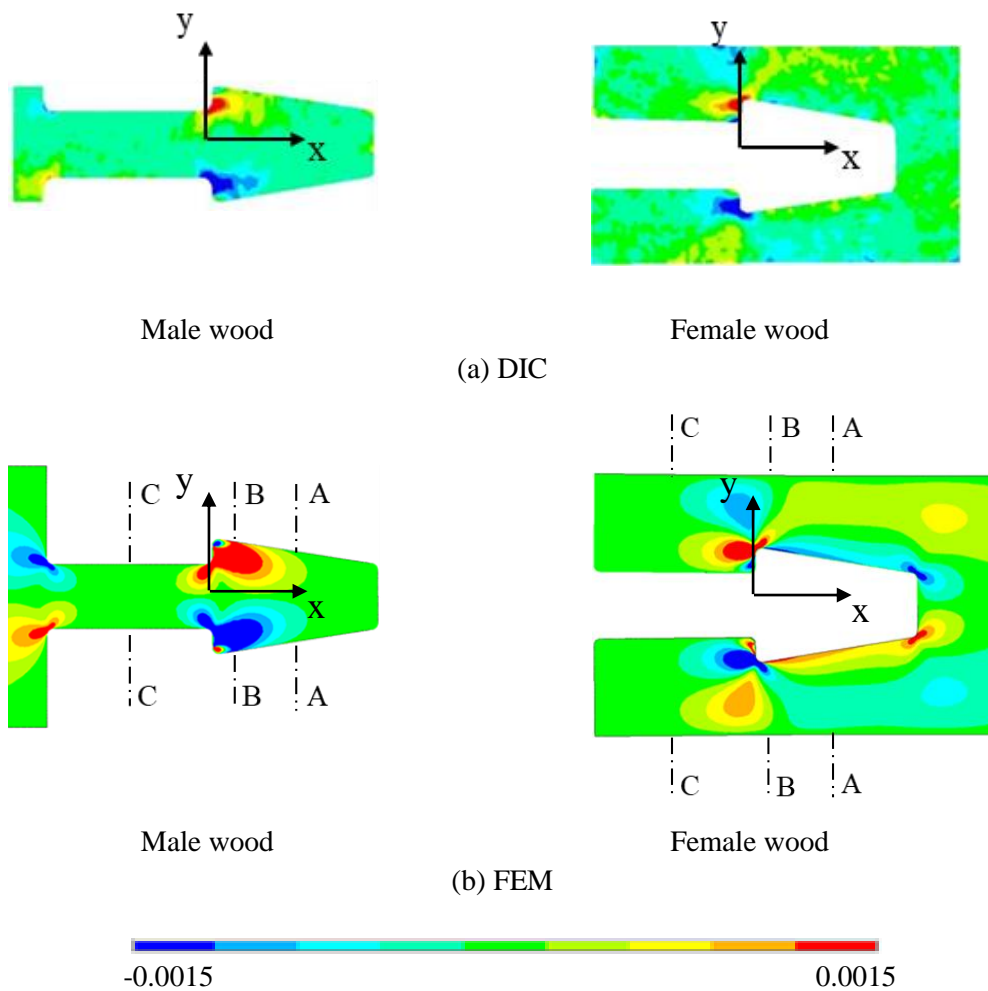


図 3-15 せん断ひずみ $\gamma_{xy}$ の分布 (アクリル試験片)

図 3-16～図 3-18 は、図 3-13～図 3-15 における AA, BB, CC 断面上の各ひずみ成分の分布を表す。実線が FEM, プロットが DIC の結果である。各ひずみ成分において DIC, FEM の結果とよく一致している。

図 3-16 に示す  $\varepsilon_x$  の分布をみると、男木は、BB 断面で端部は圧縮ひずみ、中心部は引張ひずみが生じひずみ分布が大きく変化している。また、女木 AA 断面, BB 断面について、中心に近づくにつれてひずみが大きくなっており、特に BB 断面が最もひずみが大きくなっている。

図 3-17 に示す  $\varepsilon_y$  の分布をみると、男木、女木ともに、各断面におけるひずみの大きさは  $x$  軸方向に比べて小さい。BB 断面では、男木は端部で引張ひずみが生じ、中心部で圧縮ひずみ、女木は中心に向かうにつれ圧縮ひずみが大きくなっている。これらの変化は、 $x$  軸方向ひずみと逆の変化であるが、これは、 $x$  軸方向の引張荷重により生じる横ひずみであるためである。また、BB 断面で DIC のひずみ変化が中心軸に対して非対称であるが、これは試験片の継手部の加工精度の問題で引張荷重が継手両側に均等に作用せず、ひずみに偏りが生じたためと考えられる。

図 3-18 の  $\gamma_{xy}$  の分布をみると、BB 断面において、男木は鎌あご部付近、女木は鎌あご部先端でせん断ひずみが大きくなっている。

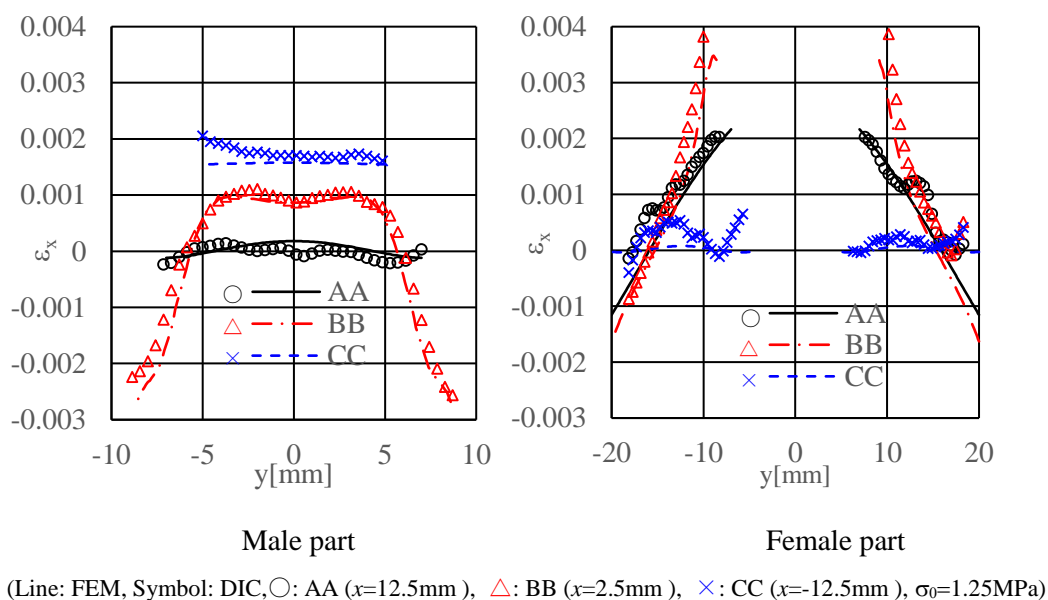
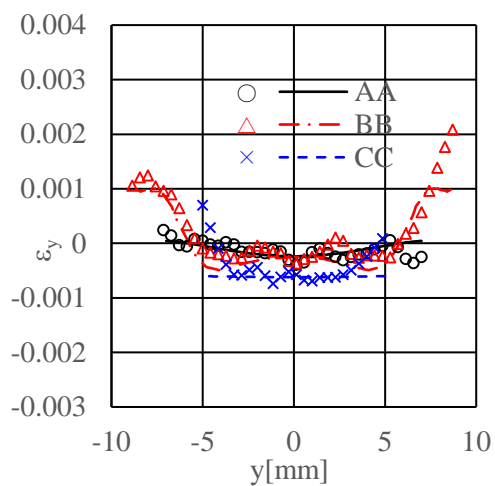
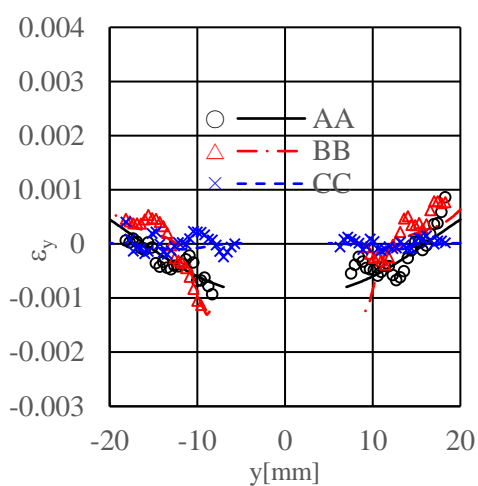


図 3-16  $x$  方向垂直ひずみ  $\varepsilon_x$  の横断面ひずみ分布



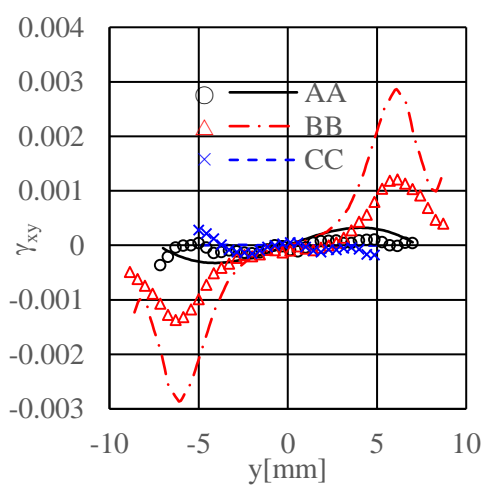
Male part



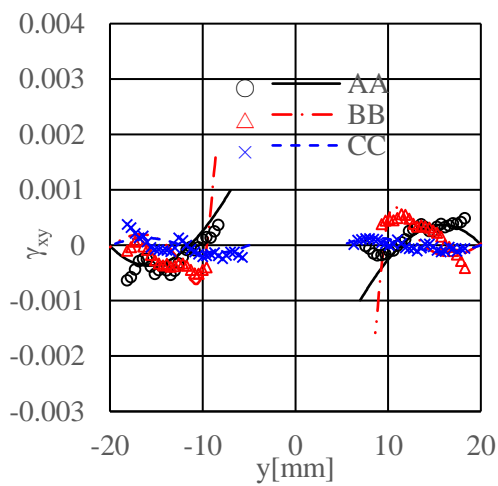
Female part

(Line: FEM, Symbol: DIC, ○: AA ( $x=12.5\text{mm}$ ),  $\triangle$ : BB ( $x=2.5\text{mm}$ ),  $\times$ : CC ( $x=-12.5\text{mm}$ ),  $\sigma_0=1.25\text{MPa}$ )

図 3-17  $y$  方向垂直ひずみ $\varepsilon_y$ の横断面ひずみ分布



Male part



Female part

(Line: FEM, Symbol: DIC, ○: AA ( $x=12.5\text{mm}$ ),  $\triangle$ : BB ( $x=2.5\text{mm}$ ),  $\times$ : CC ( $x=-12.5\text{mm}$ ),  $\sigma_0=1.25\text{MPa}$ )

図 3-18 せん断ひずみ $\gamma_{xy}$ の横断面ひずみ分布

アクリル試験片の $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ の分布を図3-19~3-21に示す。各応力成分共に、男木部は鎌あご部根元に、女木部は鎌あご先端部付近に応力が集中している。また、DICとFEMの結果はよく一致している。

図3-19に示す $\sigma_x$ を見ると、鎌あご部で、男木、女木ともに接触応力が生じている。また、男木は鎌あご部根元、女木は鎌あご部先端で大きな引張応力が生じている。

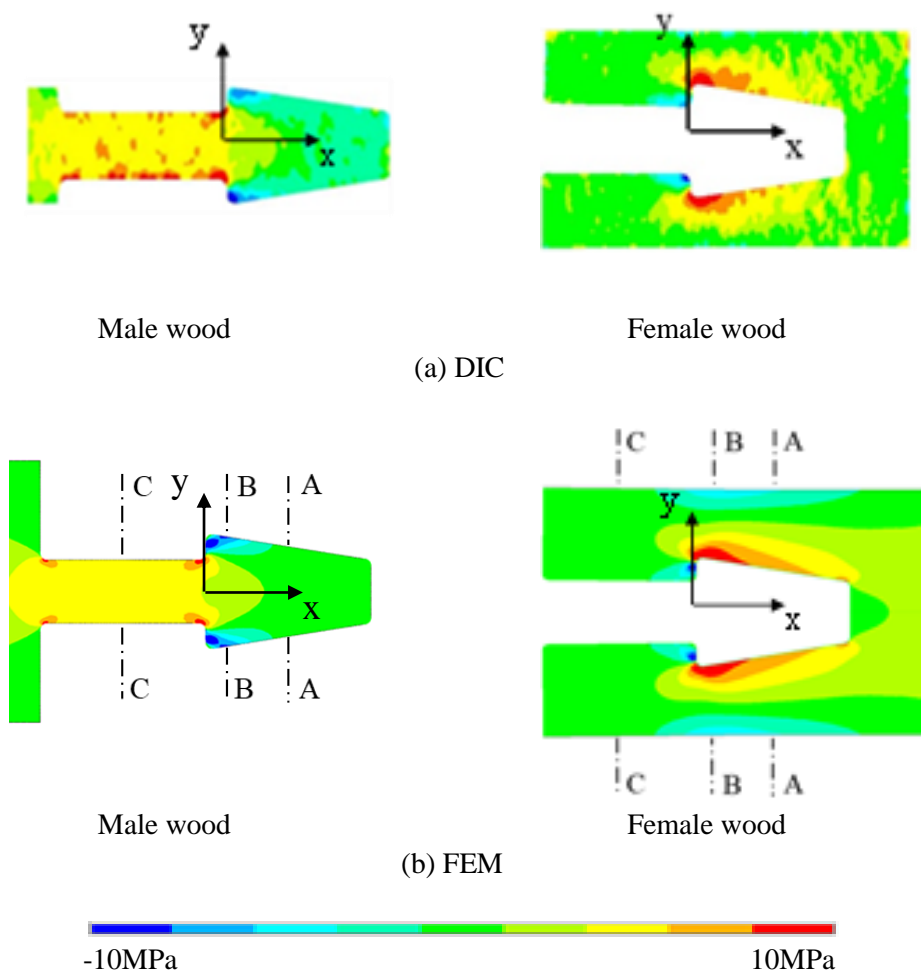


図3-19  $x$ 方向垂直応力 $\sigma_x$ の分布（アクリル試験片）

図 3-20 に示す $\sigma_y$ を見ると、鎌あご部で、男木、女木とも引張応力が生じている。さらに男木については、鎌頭部中心で圧縮応力が生じている。これは鎌あご部に接触圧力が作用することにより鎌あご部にモーメントが作用しこれにより生じる圧縮の曲げ応力と考えられる。

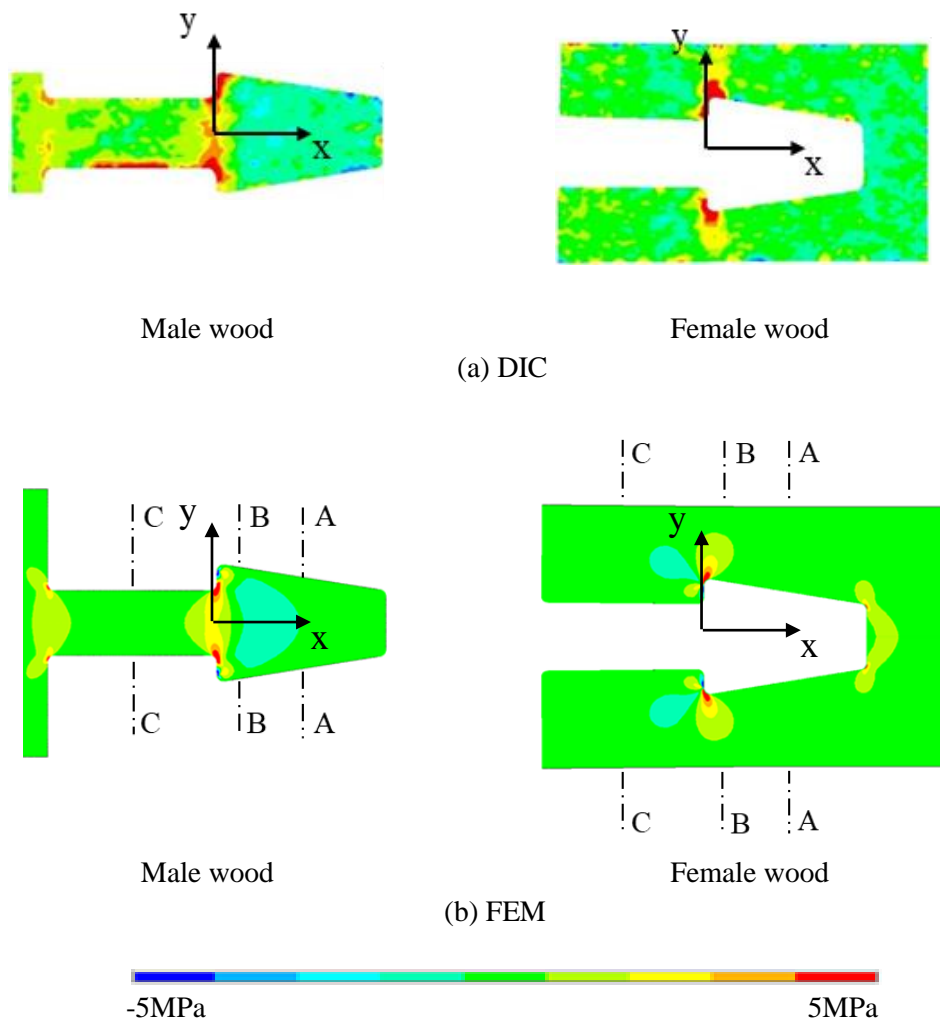


図 3-20 y 方向垂直応力 $\sigma_y$ の分布 (アクリル試験片)

図 3-21 に示す  $\tau_{xy}$  を見ると、鎌あご部で、女木、男木とも、継手フィレット部でせん断応力が生じている。最大せん断応力が生じる箇所は、男木は鎌あご部根元、女木は鎌あご部先端である。

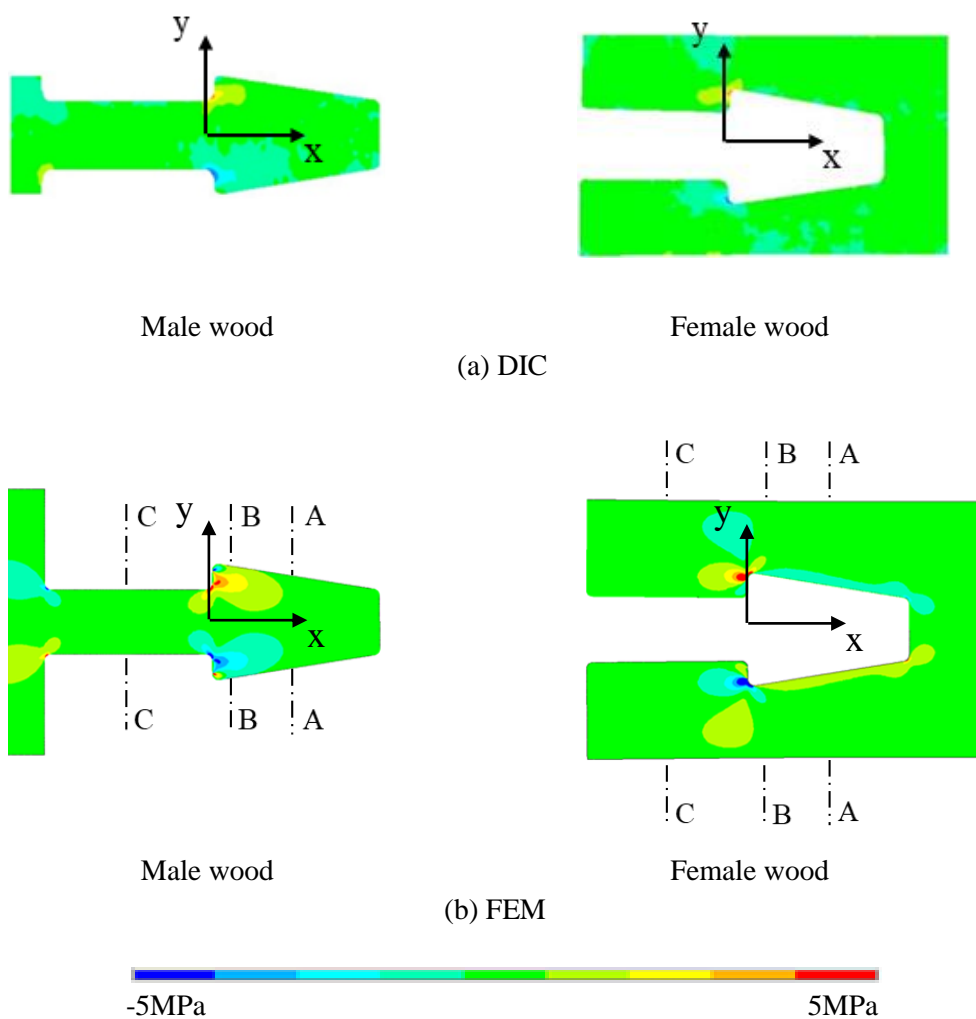


図 3-21 せん断応力  $\tau_{xy}$  の分布 (アクリル試験片)

図 3-22～図 3-24 は、図 3-19～図 3-21 の AA, BB, CC 断面での変化を表す。実線が FEM, プロットが DIC の結果である。各応力成分において DIC, FEM の結果とよく一致している。

図 3-22 に示す  $x$  方向の垂直応力分布をみると、男木は、BB 断面で端部は圧縮応力、中心部は引張応力が生じ応力分布が大きく変化している。また、女木 AA 断面, BB 断面について、中心に近づくにつれて応力が大きくなっており、特に BB 断面が最も応力が大きくなっている。

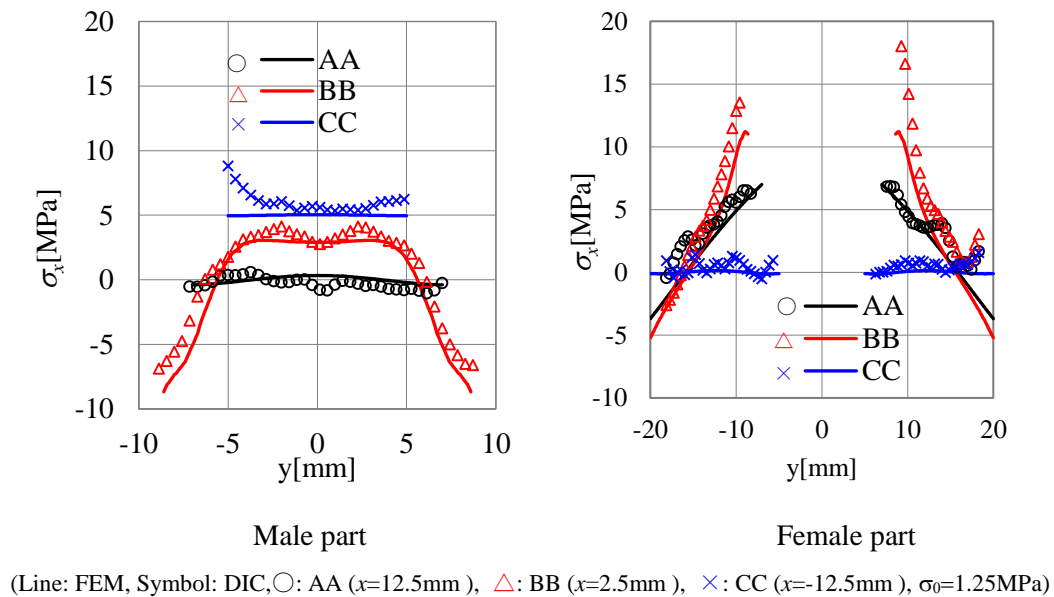
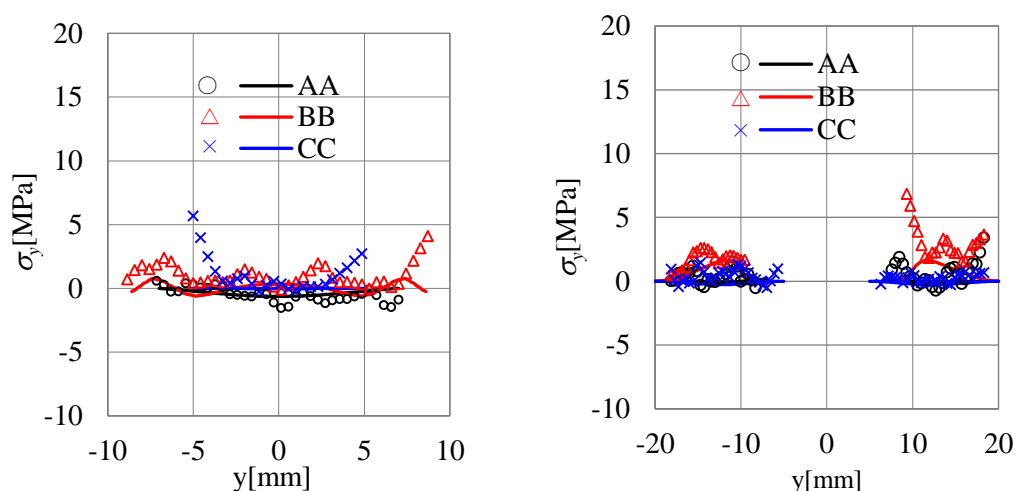


図 3-22  $x$  方向垂直応力  $\sigma_x$  の横断面応力分布 (アクリル試験片)

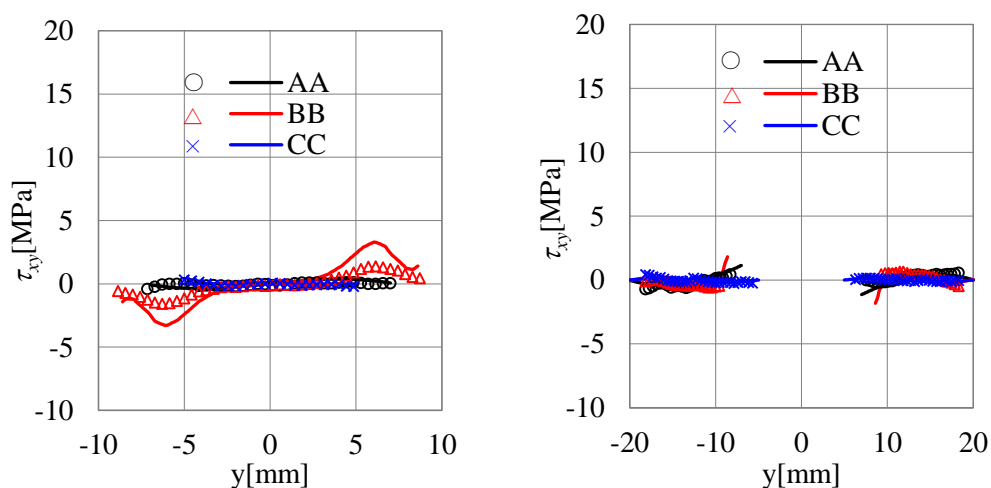
図 3-23 に  $y$  方向の応力分布を示す。男木、女木ともに、各断面における応力の大きさは  $x$  軸方向に比べて小さい。これは、幅方向に引張荷重または接触圧力が生じていないためである。また、BB 断面で DIC のひずみ変化が中心軸に対して非対称であるが、これは試験片の継手部の加工精度の問題で引張荷重が継手両側に均等に作用せず、ひずみに偏りが生じたためと考えられる。

図 3-24 のせん断応力分布をみると、BB 断面において、男木は鎌あご部付近、女木は鎌あご部先端でせん断応力が大きくなっている。



(Line: FEM, Symbol: DIC, ○: AA ( $x=12.5\text{mm}$ ), △: BB ( $x=2.5\text{mm}$ ), ×: CC ( $x=-12.5\text{mm}$ ), □□□1.25MPa)

図 3-23  $y$  方向垂直応力  $\sigma_y$  の横断面応力分布 (アクリル試験片)



(Line: FEM, 点: DIC, Plot: AA ( $x=12.5\text{mm}$ ), △: BB ( $x=2.5\text{mm}$ ), ×: CC ( $x=-12.5\text{mm}$ ),  $\sigma_0=1.25\text{MPa}$ )

図 3-24 せん断応力  $\tau_{xy}$  の横断面応力分布 (アクリル試験片)



図3-25に、アクリル試験片の男木部、女木部の第一主応力の分布を示す。DICとFEMの主応力分布はよく一致している。男木部については鎌あご部根元、女木部については鎌あご部先端で主応力が最大となっているため、この部分で破壊が始まると考えられる。男木部の破壊について、宇京らの鎌継手引張試験<sup>9)</sup>では、あご付け根近傍の局部破壊または鎌あご部の圧縮破壊により破壊することから、本解析結果は宇京らの実験結果に整合している。また、DICで測定している最大主応力は、FEMの計算値より、2、3割程度小さい値を取っている。これは、DICにおいては、各サブセットで観測されるひずみ値がサブセット内の平均的なひずみ値となるため分解能が低下する<sup>(10)</sup>。このため、ひずみ変化が大きい応力集中部近傍でFEMとDICに差異が生じたことが原因の一つとして考えられる。

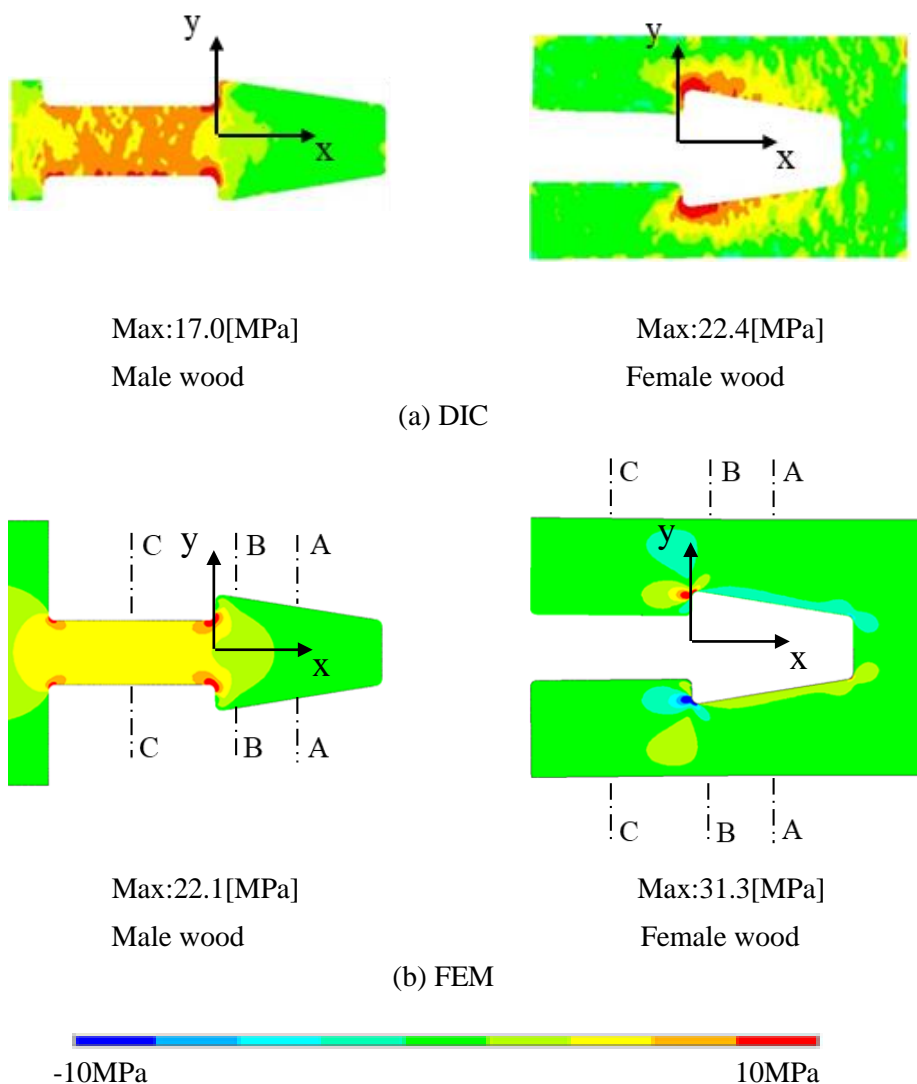
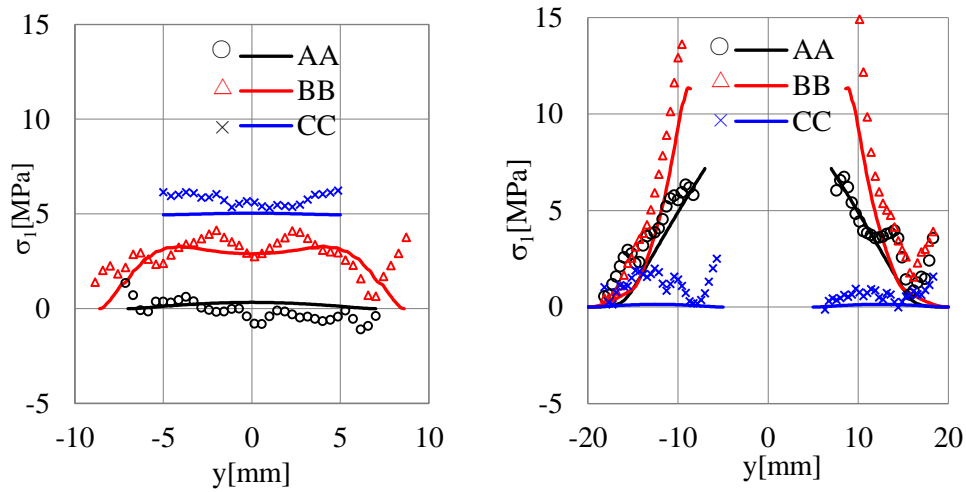


図 3-25 第一主応力の分布 (アクリル試験片)



(Line: FEM, 点: DIC, Plot: AA ( $x=12.5\text{mm}$ ),  $\Delta$ : BB ( $x=2.5\text{mm}$ ),  $\times$ : CC ( $x=-12.5\text{mm}$ ),  $\sigma_0=1.25\text{MPa}$ )

図 3-26 第一主応力の横断面応力分布 (アクリル試験片)

図 3-26 に図 3-25 に示すアクリル試験片の AA, BB, CC 断面での DIC 及び FEM より得られた第一主応力の分布を示す。応力変化が大きい BB 断面中心部で両者の値に若干の差異があるものの、各断面において両者の応力分布はよく一致している。

## (2) MDF材

図3-27及び図3-28に、MDF試験片の男木部、女木部の第一主応力の分布を種々の鎌あご部幅 $S$ に対して示す。図3-23は、DICによる応力分布、図3-24はFEMによる応力分布を示す。アクリル材と同様、男木部については鎌あご部根元、女木部については鎌あご部先端で主応力が最大となっており、FEMとDICの結果は一部領域で差異があるが、応力集中部の分布はよく一致している。また、 $S$ が4, 6, 8mmと大きくなるにしたがい、女木部の最大主応力は大きくなっていく。一方、男木部の最大主応力は女木部に比べ変化は小さいが若干減少している。

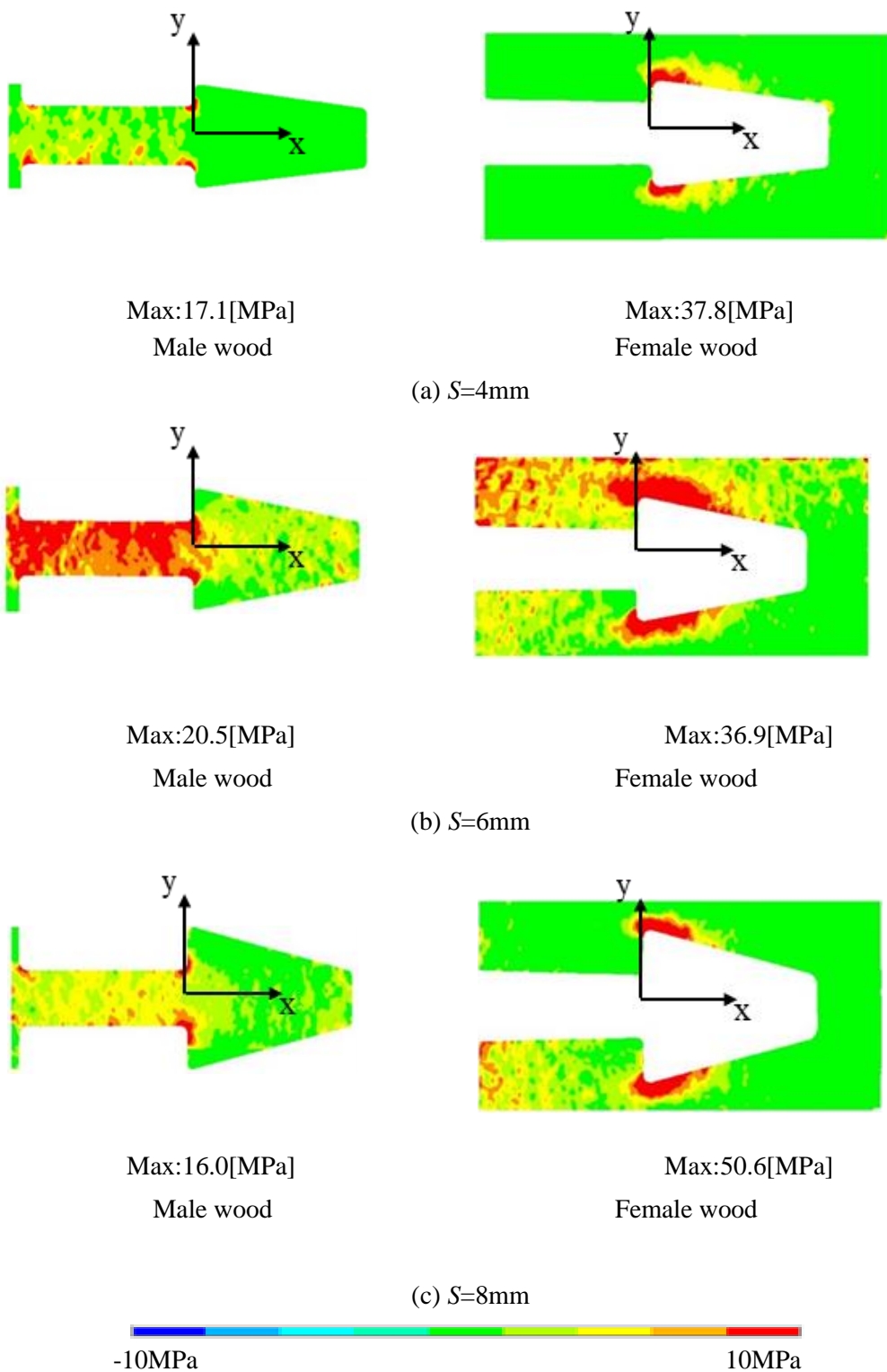


図 3-27 鎌あご幅  $S$  を変化させたときの第一集応力分布 (DIC, MDF 試験片)

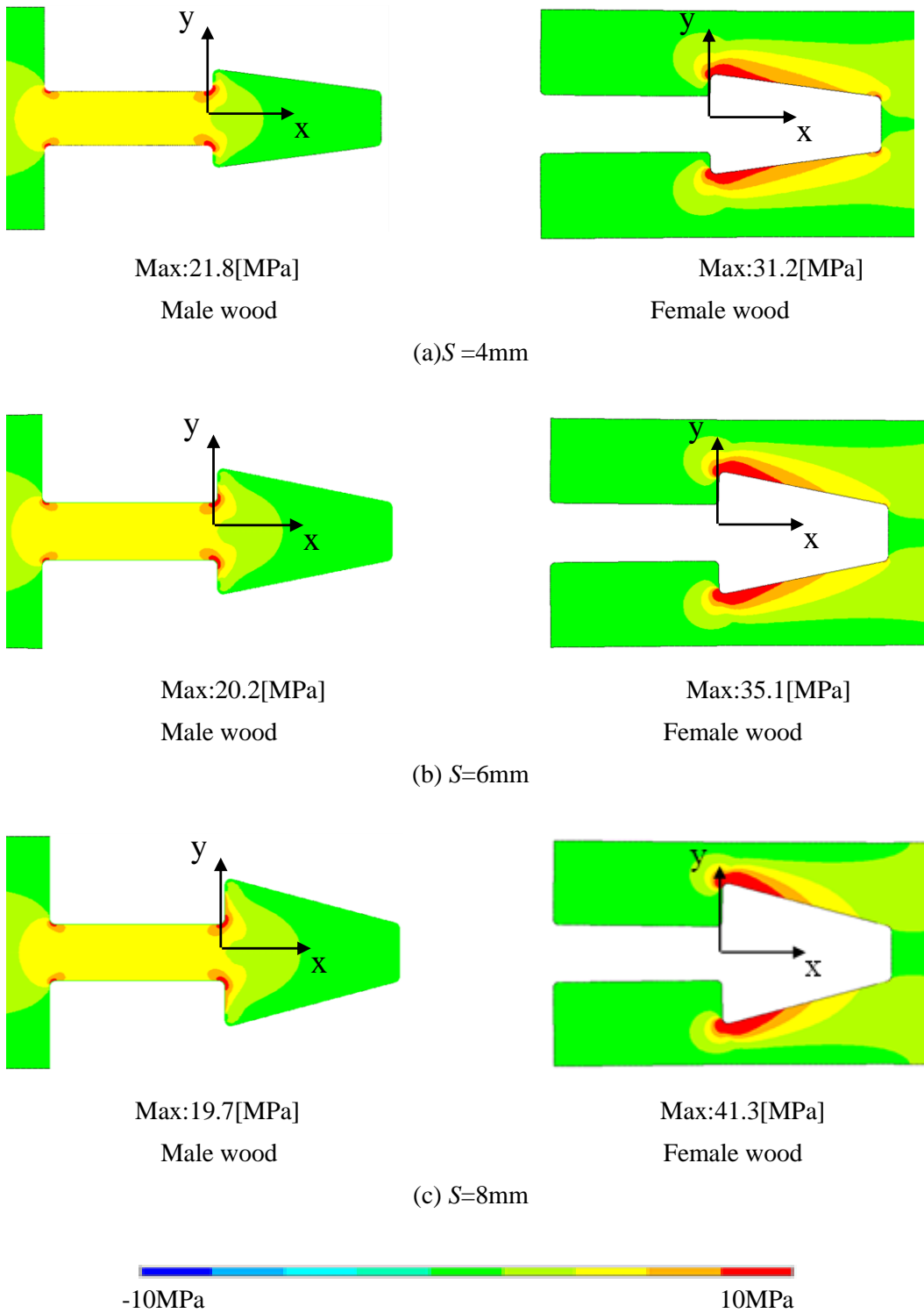


図 3-28 鎌あご幅  $S$  を変化させたときの第一集応力分布 (FEM, MDF 試験片)

### 3.4.2 直交異方性材料

アガチス材試験片について、DIC 及び FEM により求めた試験片継手部の男木部及び女木部の  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  の分布を図 3-29~3-31 に示す。各応力成分の分布において、DIC と FEM の結果はよく一致している。

図 3-29 に示す  $x$  軸方向の垂直応力  $\sigma_x$  の分布をみると、男木部は鎌あご部根元、女木部は鎌あご先端部で大きな引張応力が生じている。また、男木が噛み合う鎌あご部には圧縮応力が生じている。

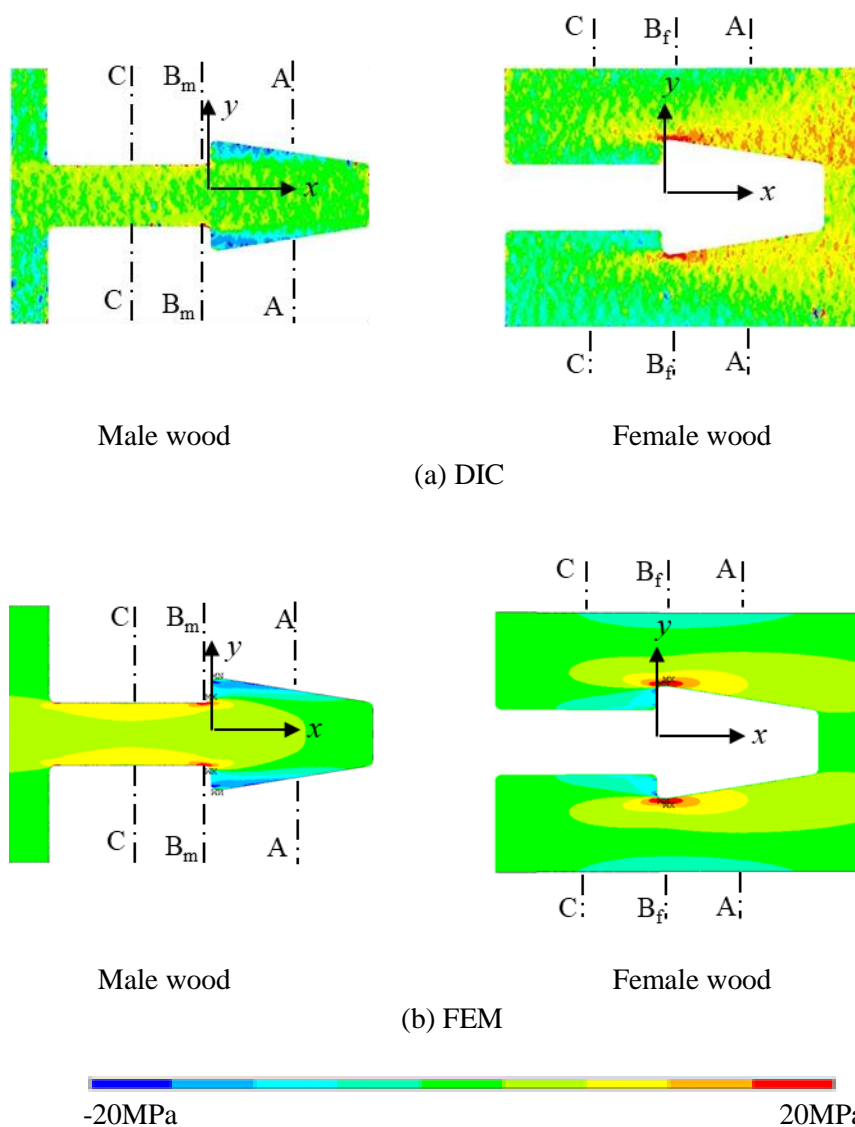


図 3-29  $x$  方向垂直応力  $\sigma_x$  の分布 (アガチス試験片)

y 軸方向の垂直応力 $\sigma_y$ については, 図 3-30 に示すように, 鎌継手あご部で接触圧力により引張応力が生じている.

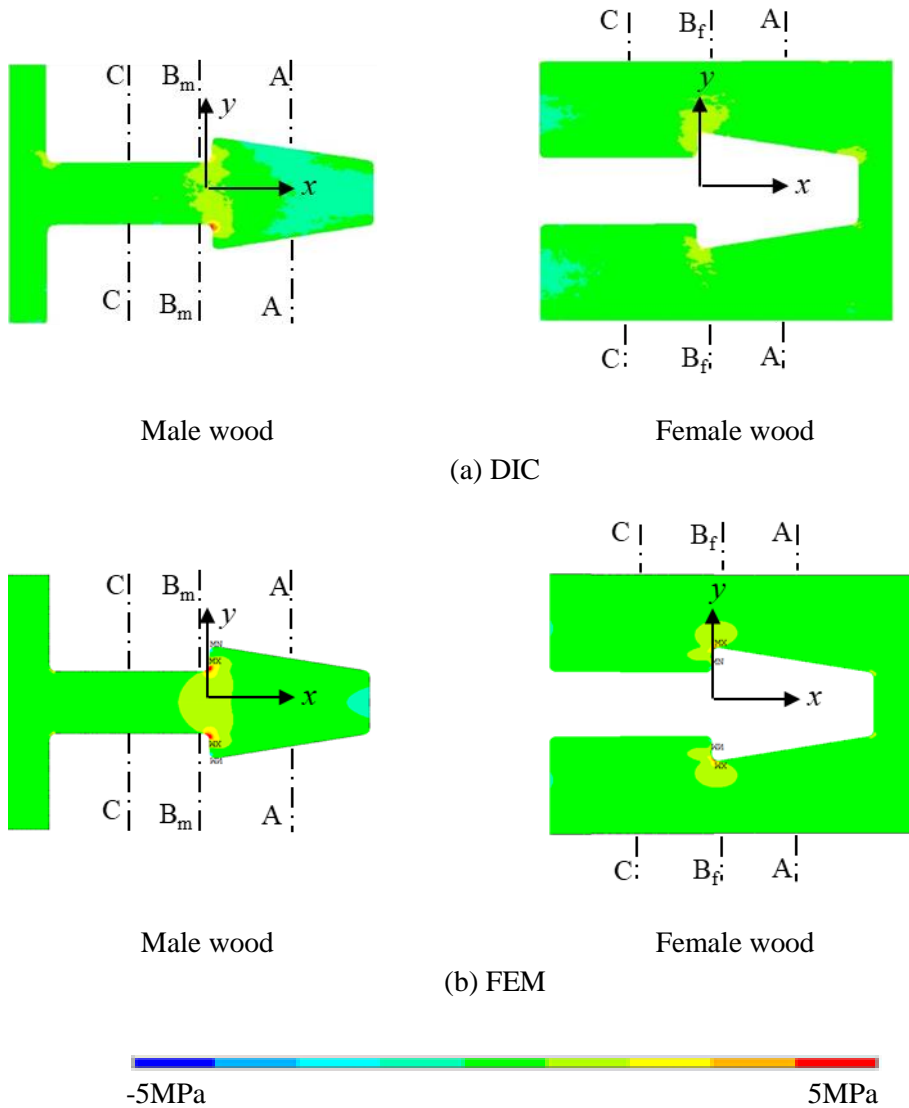


図 3-30 y 方向垂直応力 $\sigma_y$ の分布 (アガチス試験片)

せん断応力  $\tau_{xy}$  については，図 3-31 に示すように，男木は鎌あご部根元，女木は鎌あご部先端で大きな応力が生じている。

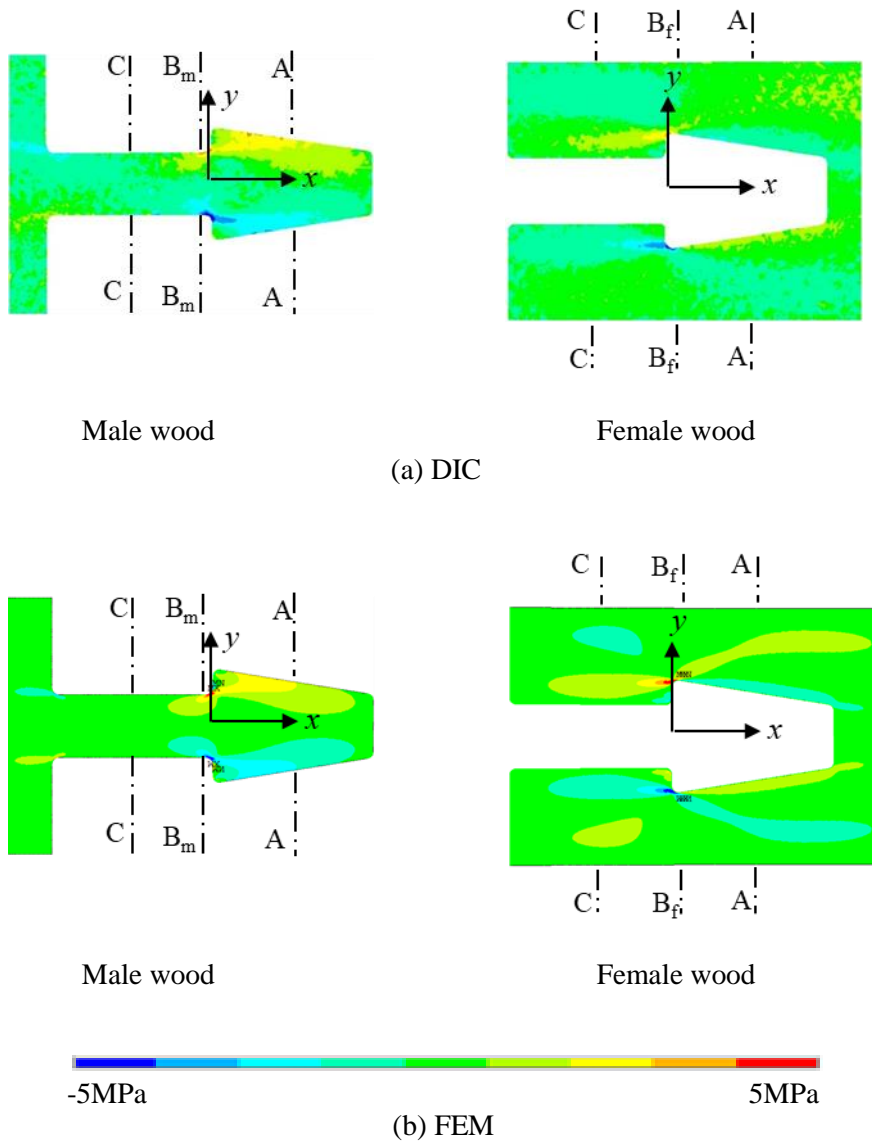
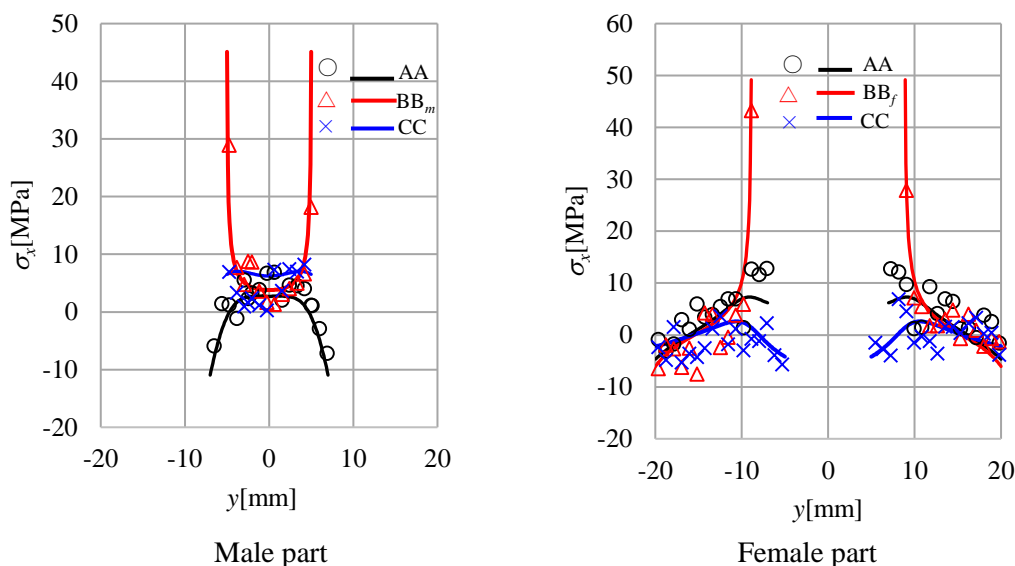


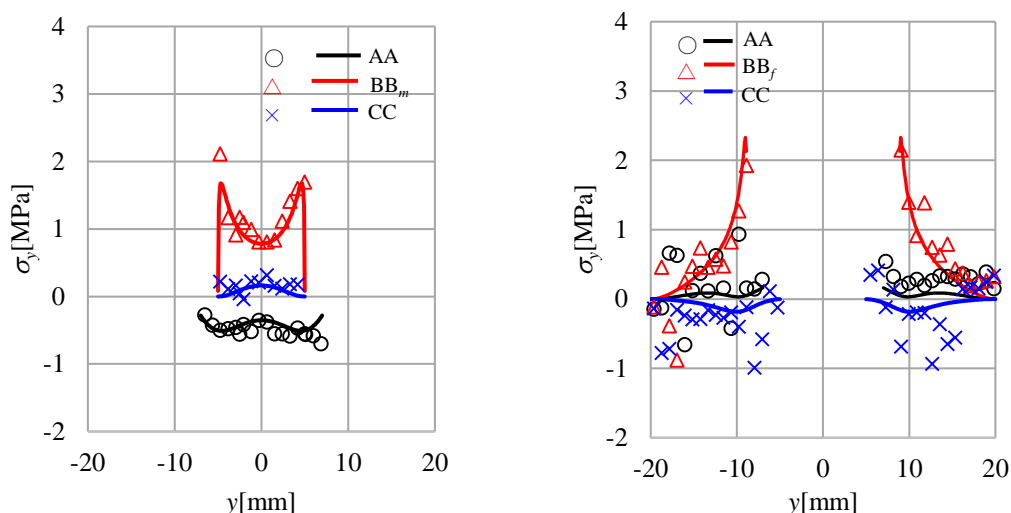
図 3-31 せん断応力  $\tau_{xy}$  の分布 (アガチス試験片)

図 3-29～3-31 に示してある AA,  $BB_m$ ,  $BB_f$ , CC 断面上の各応力成分の分布を図 3-32～図 3-34 に示す.  $BB_m$ ,  $BB_f$  断面はそれぞれ男木, 女木の応力集中部を通る断面である. 記号が DIC, 線が FEM の結果を表している. 各断面, 各応力成分において, 一部領域で差があるが, 全体的に両者の各応力成分の分布はよく一致している.



(Line: FEM, Symbol: DIC, Plot: AA ( $x=12.5\text{mm}$ ),  $\Delta$ : BB ( $x=2.5\text{mm}$ ),  $\times$ : CC ( $x=-12.5\text{mm}$ ),  $\sigma_0=1.67\text{MPa}$ )

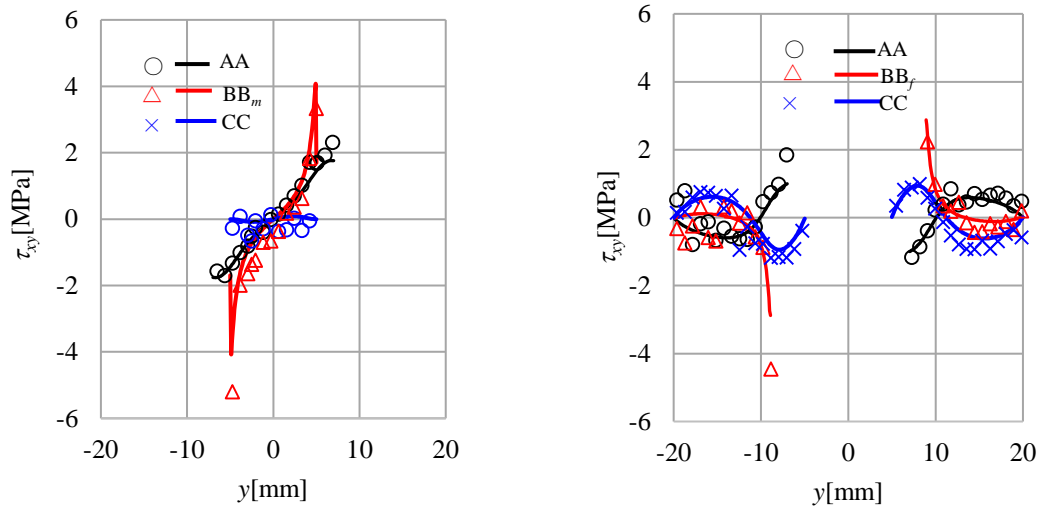
図 3-32  $x$  方向垂直応力  $\sigma_x$  の横断面応力分布 (アガチス試験片)



(Line: FEM, Symbol: DIC, Plot: AA ( $x=12.5\text{mm}$ ),  $\Delta$ : BB ( $x=2.5\text{mm}$ ),  $\times$ : CC ( $x=-12.5\text{mm}$ ),  $\sigma_0=1.67\text{MPa}$ )

図 3-33  $y$  方向垂直応力  $\sigma_y$  の横断面応力分布 (アガチス試験片)

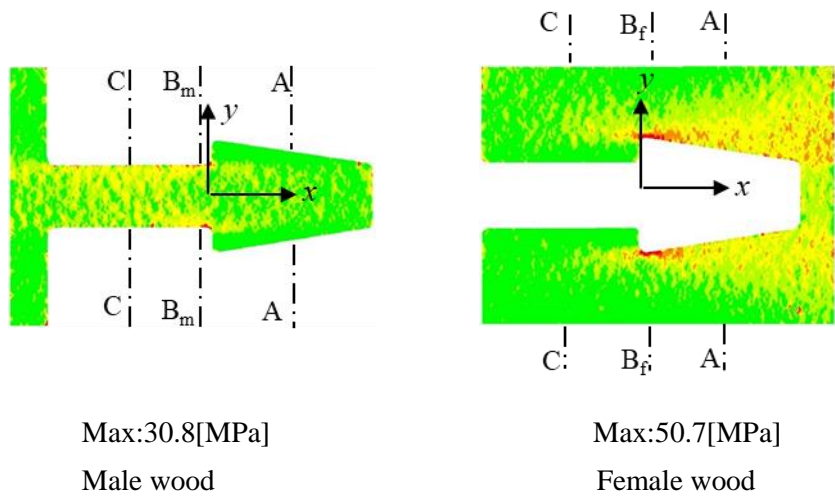




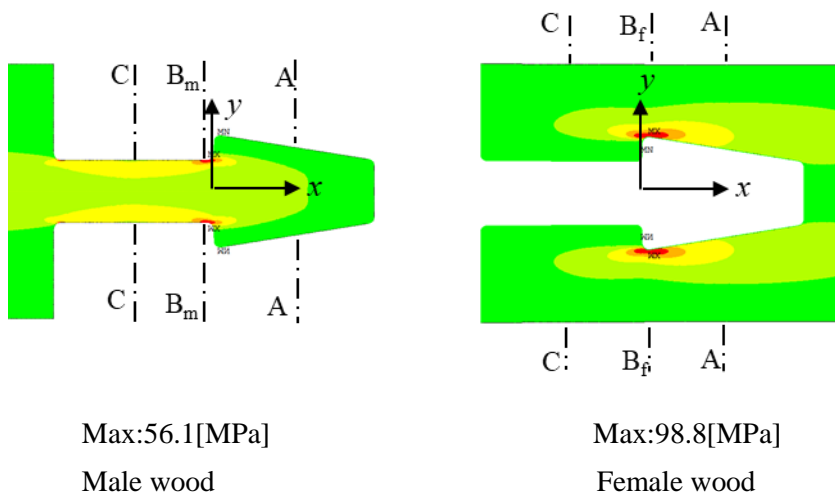
(Line: FEM, Symbol: DIC, Plot: AA (x=12.5mm), △: BB (x=2.5mm), ×: CC (x=-12.5mm),  $\sigma_0=1.67\text{MPa}$ )

図 3-34 せん断  $\tau_{xy}$  の横断面応力分布 (アガチス試験片)

図 3-35 に、試験片継手部の男木部、女木部の第一主応力の分布を示す。DIC と FEM の主応力分布はよく一致している。男木部については鎌あご部根元、女木部については鎌あご部先端で主応力が最大となっているため、この部分で破壊が始まると考えられる。男木部の破壊について、宇京らの鎌継手引張試験<sup>9)</sup>では、あご付け根近傍の局部破壊または鎌あご部の圧縮破壊により破壊することから、本解析結果は宇京らの実験結果に整合している。また、DIC で測定している最大主応力は、FEM の計算値より、半分程度となっている。これは、DIC においては、各サブセットで観測されるひずみ値がサブセット内の平均的なひずみ値となるため<sup>11)</sup>、サブセット内の最大値と差異が生じたものと考えられる。このことは、サブセット半径を変えて上記の DIC を行った結果、サブセット半径が大きくなるにつれ、測定される最大ひずみ値が小さくなる傾向であることから確認できる。



(a) DIC

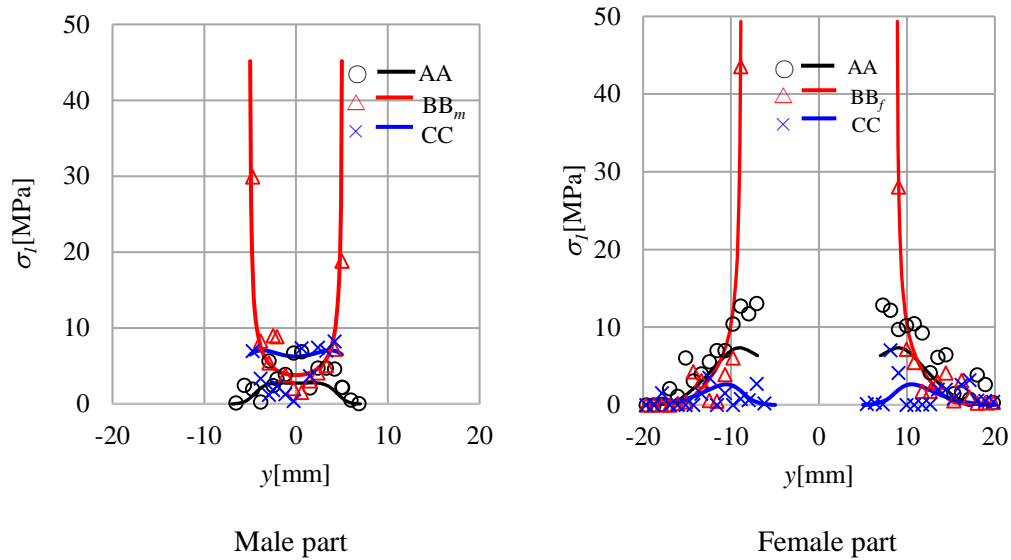


(b) FEM



図 3-35 第一主応力 $\sigma_1$ の分布 (アガチス試験片)

図 3-36 に図 3-35 に示す試験片継手部の AA ,  $BB_m$ ,  $BB_f$ , CC 断面での DIC 及び FEM より得られた第一主応力の分布を示す。応力変化が大きい BB 断面中心部など一部領域で両者の値に差異があるものの、各断面において両者の応力分布はよく一致している。



(Line: FEM, Symbol: DIC, Plot: AA ( $x=12.5\text{mm}$ ),  $\triangle$ : BB ( $x=2.5\text{mm}$ ),  $\times$ : CC ( $x=-12.5\text{mm}$ ),  $\sigma_0=1.67\text{MPa}$ )

図 3-36 第一主応力の横断面応力分布 (アガチス試験片)

### 3.5 継手応力集中係数計算式

#### 3.5.1 鎌継手の応力集中係数

脆性材料の破壊条件は最大主応力説によく適合する<sup>(12)</sup>。木材は引張に対して脆性破壊を示す<sup>(13)</sup>。さらに、筆者らが行った鎌継手の破壊試験において、最大主応力から木材の破壊が進展することを確認している。このことから、木材の破壊も他の脆性材料と同様、最大主応力説に従うと考える。また、木材の強度は、繊維方向に対する角度によって強度が異なるが、応力集中部の主応力は、応力解析の結果、継手寸法形状によらず  $x$  軸方向の垂直応力成分が支配的であり、 $x$  軸方向にほぼ平行となっている。したがって、継手の強度評価において木材の強度は寸法形状によらず一定と考える。通常、応力集中係数は、最大応力値と最小断面部の平均応力値との比として与えられるが、継ぎ手の場合、男木部と女木部で最小断面積が異なることから、部材の幅全体の断面の平均応力値と最大主応力値との比を「継手応力集中係数」として、以下のように定義する。

$$\alpha = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \quad \begin{array}{l} \alpha: \text{joint stress concentration factor of male or female wood} \\ \sigma_1: \text{maximum 1st principal stress of male or female wood} \\ \sigma_0: \text{nominal stress of test piece} \end{array} \quad (3.5)$$

継手試験片は、試験荷重を加えたとき、 $\sigma_1$ が母材強度に達した時破壊する。このとき、 $\sigma_1$ を母材の引張強度、 $\sigma_0$ を継手有する部材の引張強度とすると、継手有する部材の母材の引張荷重方向強度の割合は、継手応力集中係数の逆数となる。

図 3-37(a)に示すように、男木部は、鎌継手試験片に引張応力 $\sigma_0$ を受けるとき、上下の鎌あご部で女木からの接触圧力 $p_s$ を受ける。また、 $p_s$ により鎌あご部に曲げが生じることで AA 断面に曲げ応力が作用する。また、継手試験片の最小断面部である鎌首部の応力を $\sigma_D$ とする。この問題の継手応力集中係数を、図3-38に示す(a)最小断面部に引張応力 $\sigma_D$ を受けるフィレット部を有する段付き板、(b)切り欠き部に圧力 $p_s$ を受ける両側切り欠きを有する帯板、(c)段付き部に曲げを受けるフィレット部を有する段付き板、3つの

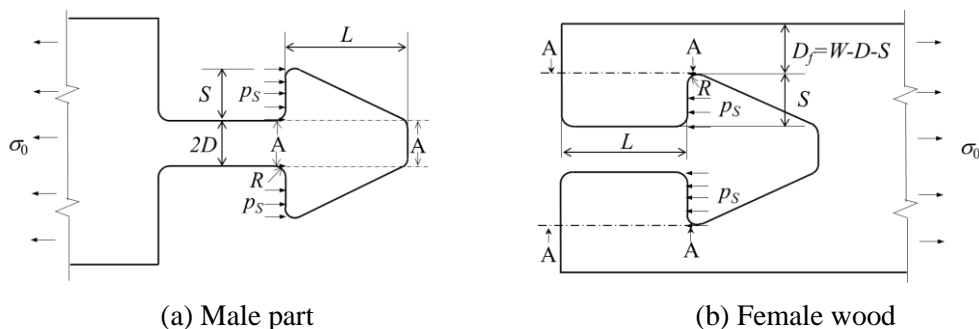


図 3-37 引張荷重が作用するときの男木、女木に生じる応力及び接触圧力

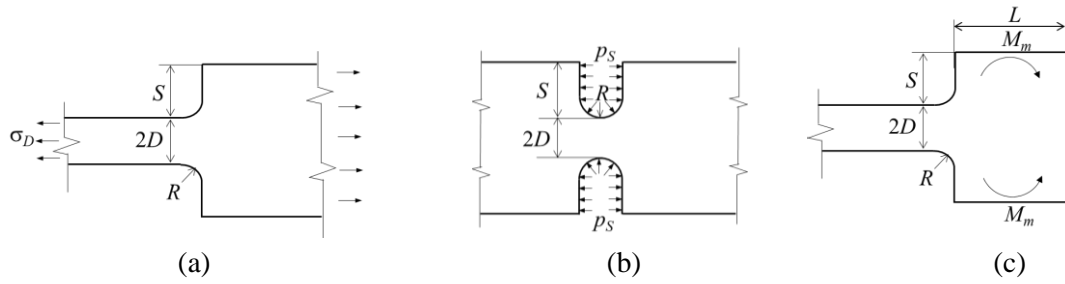


図 3-38 フィレット部を有する段付き帯板及び両側切り欠きを有する帯板の応力集中係数

問題の重ね合わせにより求めることができると考える。

このとき、応力集中する鎌あご部根本の主応力は次式で求まる。

$$\sigma_{1m} = \alpha_D \sigma_D + \alpha_S p_S + \alpha_M \sigma_{Mm} \quad (3.6)$$

ここで、 $\sigma_{Mm}$  は鎌あご部根本の曲げ応力、 $\alpha_D$  は引張を受けるフィレット部を有する段付き板、 $\alpha_S$  は圧力を受ける両側切欠きを有する帯板、 $\alpha_{Mm}$  は段付き部に曲げを受けるフィレット部を有する段付き板の応力集中係数である。

$\alpha_D$ 、 $\alpha_S$ 、 $\alpha_M$  について、2章で提案した任意の切り欠き深さにおける応力集中計算式(2.29)を用いて、以下の式を提案する。なお、 $\alpha_M$  は、 $S^*$ の影響を受けなため、 $D^*$ と $R^*$ をパラメータとする計算式としている。

$$\begin{aligned} \alpha_D &= c_{Dm} + a_{Dm} b_{Dm} \sqrt{\frac{S^* D^*}{R^* (a_{Dm}^2 S^* + b_{Dm}^2 D^*)}}, \\ \alpha_S &= a_{Sm} b_{Sm} \sqrt{\frac{S^* D^*}{R^* (a_{Sm}^2 S^* + b_{Sm}^2 D^*)}}, \\ \alpha_M &= a_{Mm} \sqrt{\frac{D^*}{R^*}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

ここで、 $L^*=L/W$ 、 $D^*=D/W$ 、 $S^*=S/W$ 、 $R^*=R/W$ 。無次元量  $a_{Dm}$ 、 $a_{Sm}$ 、 $a_{Mm}$ 、 $b_{Dm}$ 、 $b_{Sm}$  は係数である。また、 $\sigma_D$  は試験片幅  $2W$  と鎌あご幅  $2D$  の関係から  $\sigma_D = 1/D^* \sigma_0$ 、 $p_s$  は試験片幅  $2W$  と鎌あご幅  $S$  の関係から  $p_s = 1/S^* \sigma_0$ 、鎌あご部根本の曲げ応力  $\sigma_{Mm}$  は  $\sigma_{Mm} = 3 S^*/L^{*2} \sigma_0$  となる。式(3.5)~(3.7)より男木の継手応力集中係数  $\alpha_m$  を表す計算式(3.8)を提案する。

$$\alpha_m = \left( c_{Dm} + a_{Dm} b_{Dm} \sqrt{\frac{S^* D^*}{R^* (a_{Dm}^2 S^* + b_{Dm}^2 D^*)}} \right) \frac{1}{D^*} + a_{Sm} \left( a_{Sm} b_{Sm} \sqrt{\frac{S^* D^*}{R^* (a_{Sm}^2 S^* + b_{Sm}^2 D^*)}} \right) \frac{1}{S^*} + a_{Mm} \sqrt{\frac{D^* 3S^*}{R^* L^2}} \quad (3.8)$$

図 3-37(b)に示すように、女木部は、鎌継手試験片に引張応力 $\sigma_0$ を受けるとき、上下の鎌あご部で男木からの接触圧力 $p_s$ を受ける。また、 $p_s$ により鎌あご部に曲げが生じることで AA 断面に曲げ応力が作用する。女木の最小断面部 $D_f$ での応力を $\sigma_D$ とする。女木の応力集中部の形状は、片側に段付き部を有する形状となっているが、試験片両縁を中心線として反対側にも段付き部を有すると考え、図 3-38 について最小断面部 $D_f$ に引張応力 $\sigma_f$ を受けるフィレット部を有する段付き板、(b)切り欠き部に圧力 $p_s$ を受ける両側切り欠きを有する帯板、(c)段付き部に曲げを受けるフィレット部を有する段付き板、3つの問題の重ね合わせにより求める。男木と同様の手順により、女木の継手応力集中係数 $\alpha_f$ を表す計算式(3.9)を提案する。

$$\alpha_f = \left( c_{Df} + a_{Df} b_{Df} \sqrt{\frac{S^* D_f^*}{R^* (a_{Df}^2 S^* + b_{Df}^2 D_f^*)}} \right) \frac{1}{D_f^*} + a_{Sf} \left( a_{Sf} b_{Sf} \sqrt{\frac{S^* D_f^*}{R^* (a_{Sf}^2 S^* + b_{Sf}^2 D_f^*)}} \right) \frac{1}{S^*} + a_{Mf} \sqrt{\frac{D_f^* 3S^*}{R^* L^2}} \quad (3.9)$$

ここで、 $L^*=L/W$ ,  $D^*=D/W$ ,  $D_f^*=D_f/W=1-D^*-S^*$ ,  $S^*=S/W$ ,  $R^*=R/W$ . 無次元量 $a_{Df}$ ,  $a_{Sf}$ ,  $a_{Mf}$ ,  $b_{Df}$ ,  $b_{Sf}$ は係数である。式の適用範囲は、FEMを行った寸法の範囲とする。これらの係数は、各寸法パラメータを変化させFEMを行い得られる男木部、女木部の継手応力集中係数結果と、式(3.8)と(3.9)から得られる継手応力集中値が一致するように、非線形最小二乗法によるカーブフィッティングにより決定している。カーブフィッティングは、データ解析ソフト OriginLab で行い、計算アルゴリズムは、Levenberg-Marquardt法を用いている。

### 3.5.2 等方性材料の継手応力集中係数

等方性材料であるアクリル材鎌継手について、表 3-6 に示す各寸法パラメータの全ての組み合わせ 216 通りに対して FEM を行う。得られた継手応力集中係数結果と計算式(3.8), (3.9)をカーブフィッティングして求めた係数を表 3-7 に示す。

表 3-6 FEM におけるアクリル製鎌継手寸法パラメータ (W=20mm).

Parameter	dimension parameter values
$L^*$	1, 2, 3
$D^*$	0.125, 0.175, 0.225, 0.275, 0.325, 0.375
$S^*$	0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4
$R^*$	0.025, 0.05

表 3-7 応力集中係数計算式の係数

Male part		Female part	
$a_{Dm}$	0.927	$a_{Df}$	5.040
$b_{Dm}$	0.532	$b_{Df}$	1.686
$a_{Sm}$	1.276	$a_{Sf}$	0.997
$b_{Sm}$	0.532	$b_{Sf}$	0.129
$a_{Mm}$	1.017	$a_{Mf}$	0.389

式(3.8), 式(3.9)の適用範囲は, FEM を行った寸法の範囲とし,  $L^*=1\sim 3$ ,  $D^*=0.125\sim 0.375$ ,  $S^*=0.15\sim 0.4$ ,  $R^*=0.025\sim 0.05$  とする.

この係数を計算式(3.8), (3.9)に代入し得られる継手応力集中係数 $\alpha_m$ ,  $\alpha_f$ と各パラメータとの関係を図 3-39~3-42 に示す. 実線は計算式, 記号は FEM の結果を示している. 計算式の FEM に対する誤差は, 一部領域で最大 10%ほどあるが, 図中に記号で示している FEM との誤差は, 平均約 1.6%程度である. 従って, 提案する継手応力集中係数の計算式により, 数%程度の誤差で, 継手応力係数を算出することができる.

図 3-39 は,  $L^*=3.0$ ,  $R^*=0.05$  または  $R^*=0.025$  としたときの, 鎌首幅  $D^*$  と継手応力集中係数の関係である. 男木部では,  $D^*$  が大きくなるにつれ  $\alpha_m$  が小さくなる. これは, 式(3.8)第 1 項について  $D^*$  が大きくなるにつれ鎌首部の断面積が大きくなり, 鎌首部に作用する応力が小さくなるためである. 女木部では,  $D^*$  が大きくなるにつれ,  $\alpha_f$  が大きくなる. これは, 式(3.9)第 1 項において女木部の最小断面部  $D_f^* (=1 - D^* \cdot S^*)$  が  $D^*$  が大きくなるにつれ小さくなるためであると考えられる. 継手全体の継手応力集中係数は, 男木部または女木部いずれか大きい方の値であり,  $D^*$  以外のパラメータが一定のとき,  $D^*=0.12$  付近で継手応力集中係数が最小となる.

図 3-40 は,  $S^*$  と  $\alpha_m$ ,  $\alpha_f$  の関係である. なお, 図 3-35 に示すように,  $S^*$  は幾何学的条件  $S^* \geq 2R^*$  を満たす必要があるため,  $R^*=0.05$  では  $S^*=0.1$  が,  $R^*=0.025$  では  $S^*=0.05$  が最小値となる. 男木部は  $S^*$  が大きくなるにつれ継手応力集中係数が小さくなる. これは, 式(3.8)第 2 項において,  $S^*$  が大きくなるにつれ女木部との接触断面積が大きくなり,  $\alpha_m$  が小さくなるためである. 他方, 女木部については  $S^*$  が大きくなるにつれ,  $\alpha_f$  が大きく

なる。これは、式(3.9)第2項において  $S^*$  が大きくなるにつれ接触応力が小さくなることで  $\alpha_f$  が小さくなるが、同時に第1項において  $D_f^*$  が小さくなり  $\alpha_f$  が大きくなる。ふたつの要因のうち、 $D_f^*$  の減少の影響が大きいため  $S^*$  が大きくなるにつれて、 $\alpha_f$  が大きくなるものと考えられる。継手全体では、 $S^*$  以外のパラメータが一定のとき、 $S^*=0.1$  で継手応力集中係数が最小となる。

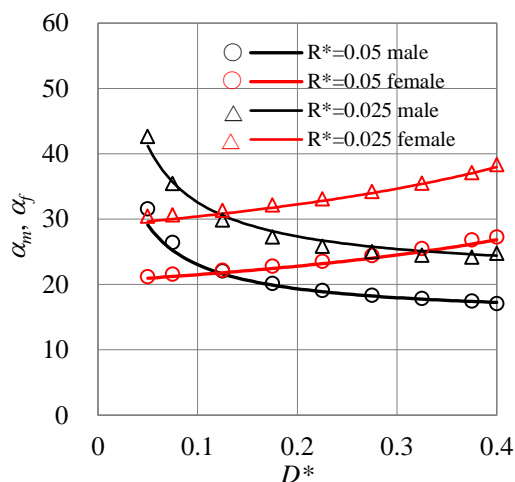


図 3-39  $L^*=3.0, S^*=0.15, R^*=0.05, 0.025$  のときの継手応力集中係数  $D^*$  の関係 (線:計算式, 記号: FEM).

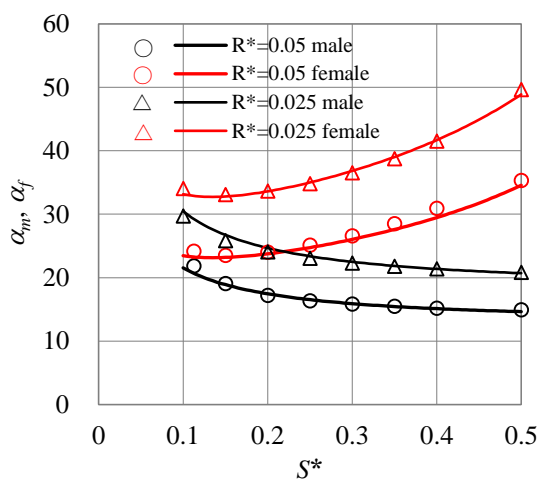


図 3-40  $L^*=3.0, D^*=0.225, R^*=0.05, 0.025$  のときの継手応力集中係数  $S^*$  の関係 (線:計算式, 記号: FEM)



図 3-41 は  $L^*$  と継手応力集中係数の関係である。男木部，女木部ともに  $L^*$  が大きくなるにつれ，継手応力集中係数は最初わずかに減少し，一定値となっている。これは， $L^*$  が大きくなるにつれ，鎌あご部に生じる曲げ応力が小さくなるためと考えられる。鎌継手引張試験<sup>(9)</sup> では， $L^*/S^* \geq 8$  ではほとんど引張強度が変化しないことから，この結果は宇京らの実験結果にも整合している。

図 3-42 は  $R^*$  と  $\alpha_m, \alpha_f$  の関係である。鎌あご部のフィレット半径  $R^*$  が大きくなるにつれ，男木部，女木部ともに継手応力集中係数は小さくなるのがわかる。

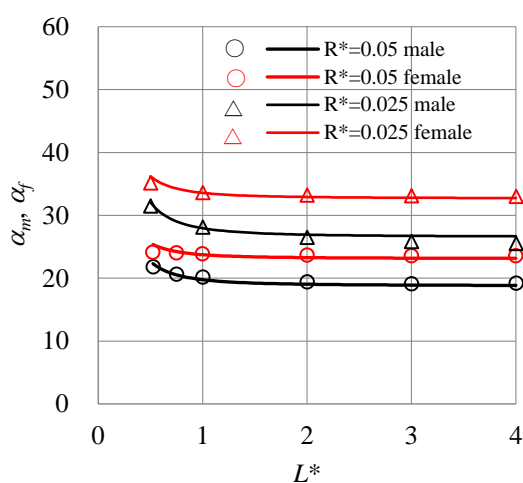


図 3-41  $D^*=0.225, S^*=0.15, R^*=0.05, 0.025$  のときの継手応力集中係数  $L^*$  の関係 (線:計算式, 記号: FEM)

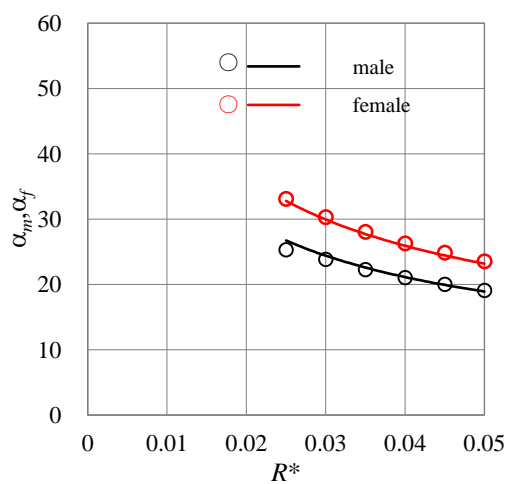


図 3-42  $L^*=3.0, D^*=0.225, S^*=0.15$  のときの継手応力集中係数  $R^*$  の関係 (線:計算式, 記号: FEM)

### 3.5.3 直交異方性材料の継手応力集中係数

直交異方性材料であるアガチス材鎌継手について、表 3-8 に示す各寸法パラメータの全ての組み合わせ 216 通りに対して FEM を行う。得られた継手応力集中係数結果と計算式(3.8), (3.9)をカーブフィッティングして求めた係数を表 3-9 に示す。式(3.8), 式(3.9)の適用範囲は, FEM を行った寸法の範囲とし,  $L^*=1\sim 3.75$ ,  $D^*=0.0625\sim 0.375$ ,  $S^*=0.2\sim 0.4$ ,  $R^*=0.025\sim 0.075$  とする。

表 3-8 FEM におけるアガチス材鎌継手寸法パラメータ (W=20mm).

Parameter	dimension parameter values
$L^*$	1.0, 1.25, 2.0, 3.0
$D^*$	0.0625, 0.125, 0.1875, 0.25, 0.3125, 0.375
$S^*$	0.2, 0.3, 0.4
$R^*$	0.025, 0.05, 0.075

表 3-9 直交異方性材料 (アガチス材) における応力集中係数計算式係数

Male part		Female part	
$a_{Dm}$	1.509	$a_{Df}$	9.121
$b_{Dm}$	1.851	$b_{Df}$	13.170
$c_{Dm}$	0.486	$c_{Df}$	0.561
$a_{Sm}$	2.288	$a_{Sf}$	2.120
$b_{Sm}$	2.504	$b_{Sf}$	6.897
$a_{Mm}$	5.878	$a_{Mf}$	6.897

図 3-43～図 3-46 に、提案する式 (3.8), (3.9)より得られる継手応力集中係数 $\alpha_m$ ,  $\alpha_f$ と各寸法パラメータとの関係を、実線で示してある。同時に、記号で FEM の結果をプロットで示している。計算式の FEM に対する差は、一部領域で最大 10%ほどあるが、図中に記号で示している FEM との差は、男木、女木共に平均 3%以内である。従って、提案する継手応力集中係数の計算式により、数%程度の誤差で、継手応力係数を算出することができる。異方性材料であるアガチス材では、継手試験片が等方性材料の場合に比べて、継手応力集中係数が 2～3 倍となっている。これは、異方性材料で引張方向の縦弾性係数が横方向の縦弾性係数より大きい場合、応力集中係数が大きくなるためである(14)。

図 3-43 は、 $L^*=1.25$ ,  $S^*=0.2$ ,  $R^*=0.05$  または  $R^*=0.025$  としたときの、鎌首幅  $D^*$  と継手応力集中係数の関係である。男木部では、 $D^*$  が大きくなるにつれ  $\alpha_m$  が小さくなる。これは、式(3.8)第 1 項において  $D^*$  が大きくなるにつれ鎌首部の断面積が大きくなり、鎌首部に作用する応力が小さくなるためである。女木部では、 $D^*$  が大きくなるに従い、 $\alpha_f$  が大きくなる。これは、式(3.9)第 1 項において女木部の最小断面部  $D_f^* (=1-D^*-S^*)$  が、 $D^*$  が大きくなるにつれ小さくなるためであると考えられる。継手全体の継手応力集中係数は、男木部または女木部いずれか大きい方の値であり、 $D^*$  以外のパラメータが一定のとき ( $L^*=1.25$ ,  $S^*=0.2$ ,  $R^*=0.05$ ) ,  $D^*=0.0625$  で継手応力集中係数が最小となる。

図 3-44 は  $S^*$  と  $\alpha_m$ ,  $\alpha_f$  の関係である。男木部は  $S^*$  の長さによらずほぼ一定である。これは、式(3.8)第 2 項において、 $S^*$  が大きくなるにつれ女木部との接触断面積が大きくなり、 $\alpha_m$  が小さくなるためであるが、 $\alpha_{Dm}$ ,  $\alpha_{Sm}$  は  $S^*$  が大きくなるにつれ増大し、2 つの要因が相殺され一定となっていると考えられる。女木部については  $S^*$  が大きくなるにつれ、 $\alpha_f$  が大きくなる。これは、式(3.9)第 2 項において  $S^*$  が大きくなるにつれ接触応力が小さくなることで  $\alpha_f$  が小さくなるが、同時に第 1 項において  $D_f^*$  が小さくなり  $\alpha_f$  が大きくなる。ふたつの要因のうち、 $D_f^*$  の減少の影響が大きいため  $S^*$  が大きくなるにつれて、 $\alpha_f$  が大きくなるものと考えられる。継手全体では、 $S^*$  以外のパラメータが一定のとき ( $L^*=1.25$ ,  $D^*=0.25$ ,  $R^*=0.05$ ) ,  $S^*=0.2$  で継手応力集中係数が最小となる。

図 3-45 は  $L^*$  と継手応力集中係数の関係である。男木部、女木部ともに  $L^*$  が大きくなるにつれ、継手応力集中係数は減少するが次第になだらかになる。これは、 $L^*$  が大きくなるにつれ、鎌あご部に生じる曲げ応力が小さくなるためと考えられる。鎌継手引張試験では、 $L^*/S^* \geq 8$  ではほとんど引張強度が変化しないことから、この結果は宇京らの実験結果(10)にも整合している。

図 3-46 に  $R^*$  と  $\alpha_m$ ,  $\alpha_f$  の関係を示す。鎌あご部のフィレット半径  $R^*$  が大きくなるにつれ、男木部、女木部ともに継手応力集中係数は小さくなることがわかる。

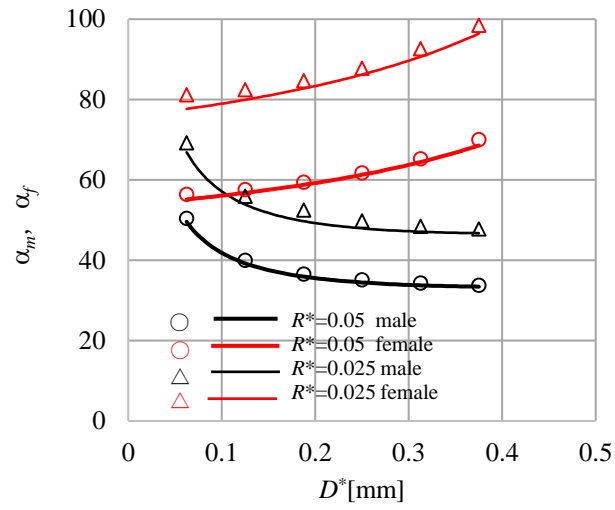


図 3-43  $L^*=1.25, S^*=0.2, R^*=0.05, 0.025$  のときの継手応力集中係数  $D^*$  の関係 (線:計算式, 記号: FEM).

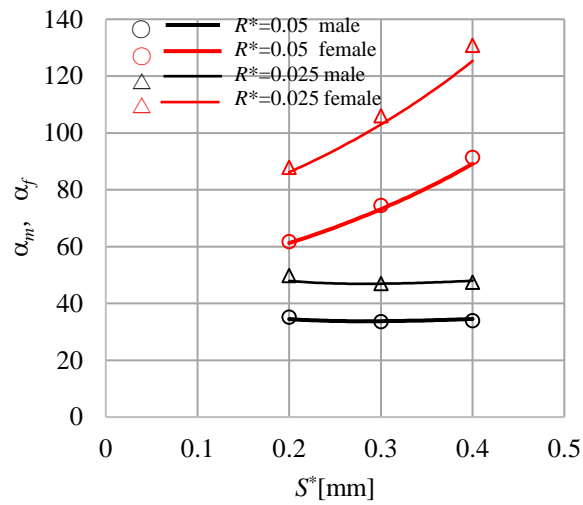


図 3-44  $L^*=1.25, D^*=0.25, R^*=0.05, 0.025$  のときの継手応力集中係数  $S^*$  の関係 (線:計算式, 記号: FEM)

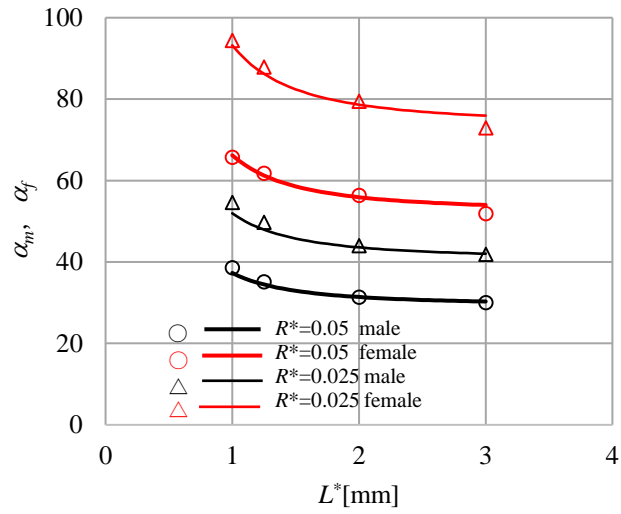


図 3-45  $D^*=0.25, S^*=0.2, R^*=0.05, 0.025$  のときの継手応力集中係数  $L^*$  の関係 (線:計算式, 記号:FEM)

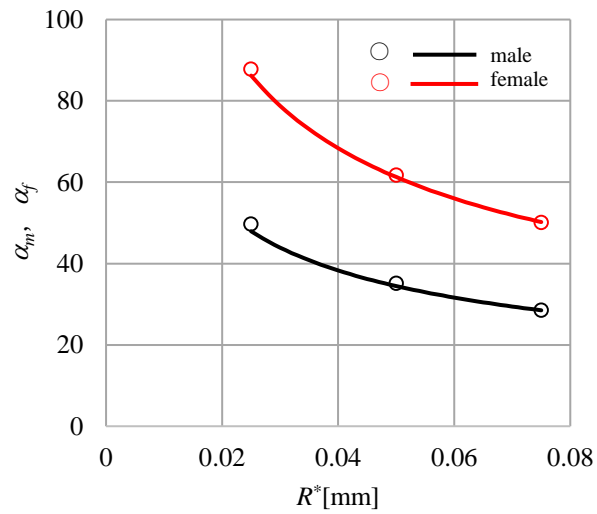


図 3-46  $L^*=1.25, D^*=0.25, S^*=0.2$  のときの継手応力集中係数  $R^*$  の関係 (線:計算式, 記号:FEM)

### 3.6 継手応力集中係数を最小とする寸法形状

一軸引張荷重に対して最大主応力を最小にする形状として鎌継手の最適寸法形状を提案式から求める。

#### 3.6.1 等方性材料

一軸引張荷重に対して最大主応力を最小にする形状として鎌継手の最適寸法を計算式から求める。  $L^*=1.25$  で固定したとき、式(3-¥8), (3.9)より得られる継手応力集中係数  $\alpha_m, \alpha_f$  の大きい方が最小となる、 $D^*, S^*, R^*$  の組み合わせを一般化簡約勾配法 (GRG 法) で求めた。なお、 $D^*, S^*, R^*$  のとる値は、表 3-6 に示す FEM を行った範囲としている。 $D^*=0.125, S^*=0.15, R^*=0.05$  において最小値をとり、継手応力集中係数は  $\alpha_m = 22.01, \alpha_f = 22.15$  を得ている。従来の形状  $D^*=0.125, S^*=0.05$  で継手応力集中係数は、 $\alpha_m = 17.77, \alpha_f = 24.67$  であり、最適寸法の継手応力集中係数は従来の形状に対して約 10% 小さくなっている。

図 3-47 に FEM により計算した最適寸法および従来の形状の主応力分布を示す。

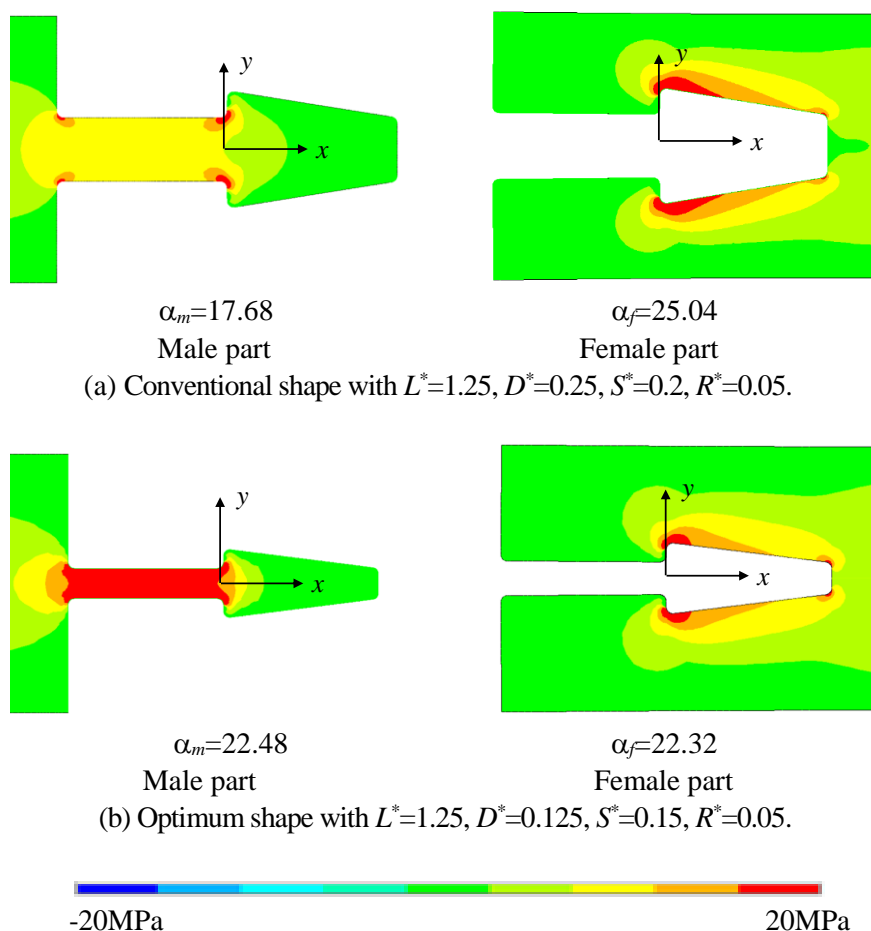


図 3-47 最適寸法と従来形状の比較 (アクリル試験片)

FEM から求めた最適寸法の継手応力集中係数は、 $\alpha_m=22.48$ 、 $\alpha_f=22.32$  で計算式から求めた値とほぼ等しい。最適寸法と従来形状の主応力分布を比べると最適寸法は男木部鎌首部、女木部鎌あご部に作用する最大主応力が均等となり、継手全体の応力集中係数が小さくなっていることがわかる。

### 3.6.2 直交異方性材料

一軸引張荷重及び曲げ荷重に対して最大主応力を最小にする形状として鎌継手の最適寸法を計算式から求める。 $L^*=1.25$  で固定したとき、式(3.8)、(3.9)より得られる継手応力集中係数 $\alpha_m$ 、 $\alpha_f$ の大きい方が最小となる、 $D^*$ 、 $S^*$ 、 $R^*$ の組み合わせを一般化簡約勾配法 (GRG 法) で求めた。なお、 $D^*$ 、 $S^*$ 、 $R^*$ のとり値は、表 3-8 に示す FEM を行った範囲としている。従来形状および引張に対する最適寸法を図 3-48 に示す。なお、比較対象である従来形状寸法は、表 3-2 より  $D^*=0.25$ 、 $S^*=0.2$ 、 $R^*$ については、実際に用いられている継手では鎌あご部にフィレットをつけていないことから計算式の適用範囲の最小寸法  $R^*=0.025$  としている。表 3-10 は、それぞれの形状について、引張を受けるときの継手応力集中係数を示す。継手応力集中係数は、計算式及び FEM から求めた結果を示している。計算式と FEM により求めた結果は、概ね一致している。

引張荷重に対しては、 $D^*=0.0625$ 、 $S^*=0.2$ 、 $R^*=0.075$  において最小値をとり、継手応力集中係数は $\alpha_m=41.9$ 、 $\alpha_f=45.2$  を得ている。最適寸法の継手試験片の母材引張強度に対する強度は、継手応力集中係数の逆数をとると 2.2%となる。従来形状における継手応力集中係数は、 $\alpha_m=47.9$ 、 $\alpha_f=86.2$ である。従来形状の継手試験片の母材引張強度に対する強度は、継手応力集中係数の逆数をとると 1.2%となる。佐藤ら<sup>(15)</sup>が行った従来形状腰掛鎌継ぎの引張試験では、継手強度は母材強度（繊維方向）に対して 0.5~0.8%程度となっており、腰掛鎌継ぎは、継手部が部材厚さの半分であることを考慮するとほぼ一致する。最適寸法の継手応力集中係数は従来の寸法に対して約半分となっている。



(a) conventional shape  
 $(L^*=1.25, D^*=0.25, S^*=0.2, R^*=0.025)$



(b) Optimum shape against tensile load  
 $(L^*=1.25, D^*=0.0625, S^*=0.2, R^*=0.075)$

図 3-48 従来形状及び引張に対する最適寸法（アガチス試験片）

表 3-10 従来形状と引張に対する最適寸法における継手応力集中係数（アガチス材）

		$\alpha_m, \alpha_f$ under tensile load	
		$\alpha_m$	$\alpha_f$
Conventional shape $(L^*=1.25, D^*=0.25, S^*=0.2, R^*=0.025)$	CAL	47.9	86.2
	FEM	49.5	88.0
Optimum shape against tensile load $(L^*=1.25, D^*=0.0625, S^*=0.2, R^*=0.075)$	CAL	41.9	45.2
	FEM	42.5	45.5



図 3-49 に、FEM による引張荷重に対する最適寸法、従来形状の主応力分布を示す。最適寸法と従来形状の主応力分布を比べると最適寸法は男木部鎌首部、女木部鎌あご部に作用する最は共に小さくなっている。これは、従来形状に比べて  $D^*$  を小さくすることで鎌首幅が細くなっているが、 $D^*$  を小さくすることで、 $\alpha_m$ 、 $\alpha_f$  が均等となり継手全体の応力集中係数が 10% 程度小さくなる。さらに、従来形状に対してフィレット半径  $R^*$  を大きくすることで継手応力集中係数を 40% 低減する。

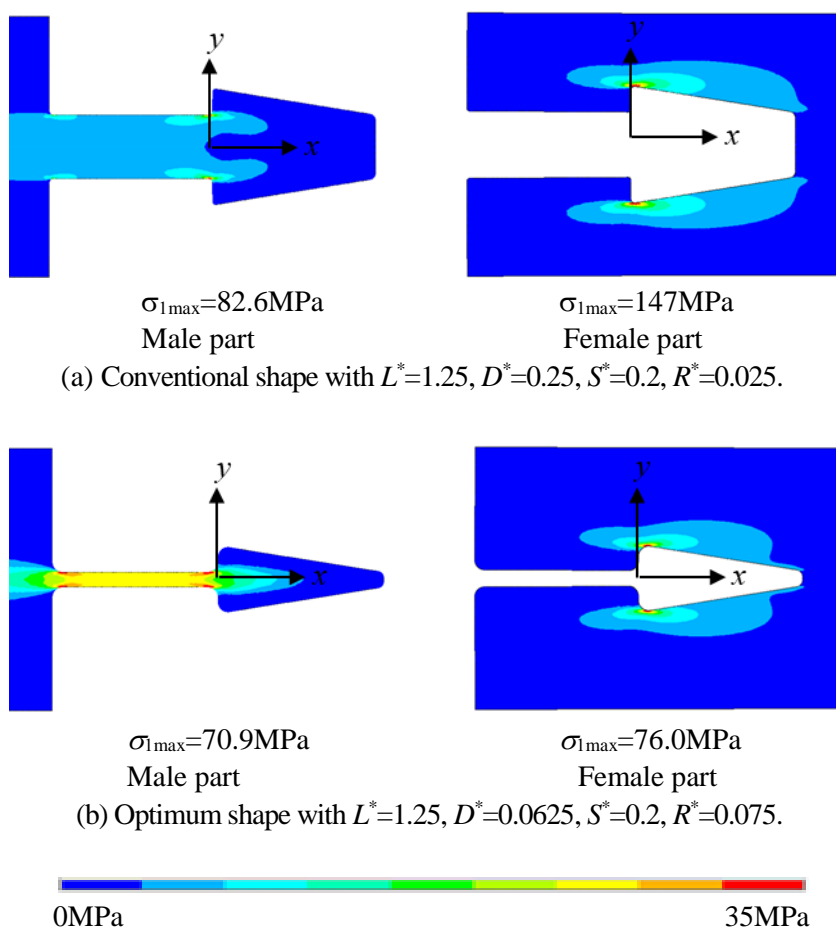


図 3-49 最適寸法と従来形状の比較（アガチス試験片）

### 3.7 まとめ

代表的な継手形状である鎌継手が一軸引張荷重を受ける場合における応力解析を実測および数値解析を用いて行い、継手部の応力集中について検討した。継手材質は、等方材料としてアクリル材、直交異方性材料としてアガチス材を選定している。はじめに、引張荷重を加えたときの鎌継手のひずみ分布を画像相関法（DIC）で測定し、鎌継手の継手応力集中部を調べた。アクリル材、アガチス材ともに男木部は鎌あご部根元、女木部は鎌あご部先端に応力集中が生じていることがわかった。また、直交異方性材料であるアガチス材の応力集中係数は、等方性材料であるアクリル材に対して2倍程度であった。これは、異方性材料で引張方向の縦弾性係数が横方向の縦弾性係数より大きい場合、応力集中係数が大きくなるためである。次に、DICの観測結果に整合するようにモデル条件を設定しFEMを行った。FEMの結果は、DICの結果によく一致し、両解析の解析結果は妥当性を持つことを確認できた。さらに、鎌継手の寸法パラメータを変えて解析を行い、鎌継手寸法と継手応力集中係数の関係を明らかにした。その結果を元に、等方性材料、直交異方性材料それぞれに対する男木部、女木部各々に対する継手応力集中係数を算出する計算式を提案した。提案した式は、FEMとの平均誤差は、等方性材料は2%以下、直交異方性材料は3%以内の誤差であった。さらに、提案した計算式から、鎌継手が一軸引張荷重を受ける時の最適寸法を求めた。アガチス材の鎌継手の最適寸法の継手応力集中係数は、従来の寸法に対して約50%となり、提案した計算式の有用性が確認された。

## 参考文献

- (1) 日本木材学会編, 木質の物理(2007), p.95, 文永堂出版.
- (2) 岡野健, 祖父江信夫編, 木材科学ハンドブック(2006), p.36, 朝倉書店
- (3) 佐川康貴, 尾上幸造, 内野正和, 松下博通, 一軸圧縮力を受けるモルタル供試体のひずみ計測への画像相関法の適用性に関する検討, 実験力学, Vol.7, No.2(2007), pp.114-120.
- (4) 出水亨, 松田浩, 戸次翔, 森崎雅敏, 内野正和, 伊藤幸広, 森田千尋, デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 68, No. 2(2012), pp.I\_683-I\_690.
- (5) 畝田道雄, 松石正克, 岩田節雄, 石川憲一, 撮影画像を用いたひずみ分布計測法に関する研究, 精密工学会誌, Vol.43, No.2(2007), pp.659-667.
- (6) Ncorr v1.2, available from <<http://www.ncorr.com/index.php>>, (参照日 2018 年 8 月 25 日).
- (7) 川口信隆, 高橋政治: アガチス材の材質について.北海道立林産試験場月報, No.220(1970), pp.11-16.
- (8) 澤田稔, 木材の変形挙動, 材料, Vol.32, No.59(1983), pp.2-11
- (9) 森林総合研究所監修, 改訂 4 版 木材工業ハンドブック(2004), p.129, 丸善出版.
- (10) 宇京斉一郎, 林知行, 原田真樹, 軽部正彦, 鎌継手におけるせん断面の繊維方向長さが引張強度に与える影響, 木材学会誌, Vol. 53, No.2 (2007), pp.90-98.
- (11) 有川秀一, 村田学, 吉田隆, 米山聡, 藤本慶久, 大本洋平, 画像相関法の精度測定に対するサブセットサイズとゲージ長の関係, 実験力学, Vol.16, No.2(2016), pp.162-167.
- (12) 大路清嗣, 中井善一, 材料強度(2006), p.15, コロナ社.
- (13) 岡野健, 祖父江信夫, 木材科学ハンドブック(2006), p.155, 朝倉書店.
- (14) 池田健: 直交異方性板の平面応力に就いて. 日本航空學會誌, Vol.9, No.90(1942), pp.1209-1219
- (15) 佐藤俊平, 藤野栄一, 大橋好光, 在来継手の引張耐力に関する研究(その 1. 腰掛け鎌継ぎ), 日本建築学会大会学術講演梗概集(2002), pp.97-98

## 4 章 曲げ荷重下での鎌継手応力解析

### 4.1 緒論

本章では、鎌継手の曲げ強度向上に資するため、継手に曲げ荷重が作用した時の応力解析を行い、継手部の応力分布、継手応力集中係数を求める。

3 章では、引張荷重を受ける鎌継手について、DIC, FEM による応力解析を行ない、両解析の結果はよく一致していることを確認した。そのうえで、応力集中係数計算式の知見を基に任意の継手寸法パラメータから継手応力集中係数を求める計算式を提案し、提案した計算式から継手応力集中係数を最小とする形状を求めた。

木造建築に用いられる継手は、構造を支持するため引張とともに曲げ荷重を受ける。曲げ荷重を受ける方向は、図 4-1 の  $y$  軸方向、 $z$  軸方向がある。 $z$  軸方向の曲げ荷重を受ける場合は、継手試験片の  $xy$  平面内で一様の曲げ応力が作用し、継手試験片の  $z$  軸上端である継手上面で引張の曲げ応力が最大となる。したがって、3 章の鎌継手試験片が引張荷重を受けるときの継手上面の応力と同様の分布となると考えられる。このため、 $y$  軸方向に曲げ荷重を受ける場合について解析を行う。

3 章では、DIC, FEM による応力解析を行ったが、両解析の結果はよく一致しており、両解析の妥当性を確認した。また、本研究に用いている万能引張試験機は、鎌継手曲げ試験に必要なスパン距離を確保することが困難なである。このことから、曲げ荷重の応力解析は FEM のみによって行っている。

さらに、解析対象とする継手の寸法パラメータを変化させたときの応力集中係数を FEM により求め、継手の寸法パラメータと応力集中係数の関係を求める。そのうえで、前章の引張荷重を受ける継手応力集中係数の計算式を基に、曲げ荷重を受けるときの継手応力集中係数計算式を提案し、FEM の結果に適合するよう計算式の係数を非線形最小二乗法により決定する。さらに、提案した計算式から応力集中係数を最小とする形状を求める。

## 4.2 継手モデル

### 4.2.1 本研究での継手モデル

図 4-1 に示す鎌継手の形状は，引張荷重を受ける場合と同様，2次元構造の鎌継手とする．鎌継手形状の寸法パラメータは，試験片幅  $2W$ ，鎌首部幅  $2D$ ，鎌あご部付け根のフィレット半径  $R$ ，鎌頭部長さ  $L$ ，鎌あご部幅  $S$ ，厚さ  $T$  で表す．ここで，試験片鎌頭部長さ  $L$ ，鎌首長さ  $D$ ，鎌あご幅  $S$ ，フィレット半径  $R$  を試験片幅  $W$  で除して，無次元化した寸法パラメータ  $L^*=L/W$ ， $D^*=D/W$ ， $S^*=S/W$ ， $R^*=R/W$  を導入する．また，鎌首長さと鎌頭部長さ  $L$  を同じ長さとしている．

### 4.2.2 継手の材質

鎌継手の材質は，引張荷重を受ける場合と同様，等方性材料としてアクリル材及び直交異方性材料としてアガチス材とする．アクリル材とアガチス材の材料定数は表 4-1 のとおりである．

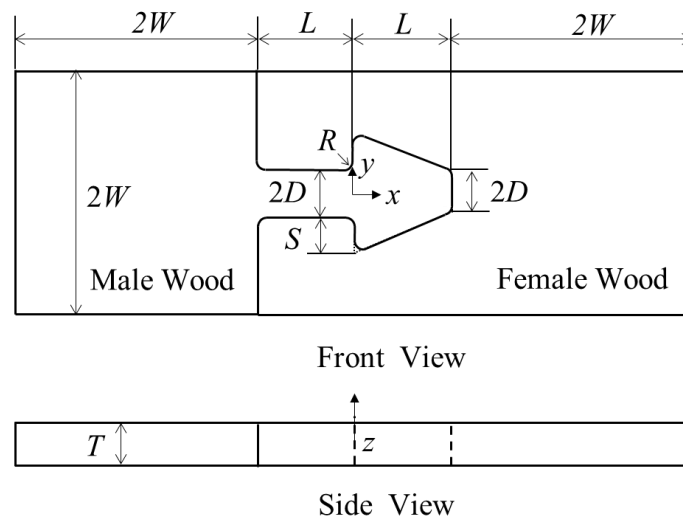


図 4-1 鎌継手の寸法

表 4-1 試験片の材料定数

	$E$ [GPa]			$\nu$	
アクリル	3.2			0.39	
MDF	4.08			0.34	
	$E_L$ [GPa]	$E_T$ [GPa]	$G_{LT}$ [GPa]	$\nu_{LT}$	$\nu_{TL}$
アガチス	14.2	0.36	0.73	0.50	0.013

### 4.3 解析方法

平面応力問題として、男木部と女木部を嵌め合うようモデルを作成し、継手部を接触領域として接触弾性解析を行っている。解析コードは、ANSYS を用いている。

#### 4.3.1 解析モデル

曲げ試験の解析モデルを図 4-2 に示す。曲げ試験は、4 点曲げとし、点 A の  $x$  軸、 $y$  軸方向変位、B 点の  $y$  軸方向変位を拘束し、点 C、点 D に曲げ荷重  $P$  を作用させる。支点間距離 (AB 間) は 400mm、荷重点間距離 (CD 間) は 200mm としている。解析モデルの寸法パラメータは、引張を受ける場合と同寸法とし、表 4-2 に示すとおりである。荷重曲げ荷重  $P$  は、アクリル材は、最大曲げ応力が 1.25MPa となるように 6.7N、アガチス材は、最大曲げ応力が 1.67MPa となるよう 8.9N としている。応力集中部の応力分布を精度よく求めるため、男木と女木がかみ合うあご部について部分領域を設けて、要素寸法を細かくしている。この領域のメッシュ寸法は、最大応力が生じる男木の鎌あご部根元のフィレット部及び女木鎌あご部先端のフィレット部についてはフィレット半径の 1/100 としている。解析モデルの寸法パラメータは、引張を受ける場合と同寸法とし、表 4-2 に示すとおりである。

メッシュ生成後、男木と女木との接触部の摩擦は、文献値の無いアクリル材は無視し、アガチス材については、文献値より静止摩擦係数を 0.5 としている<sup>(1)</sup>。

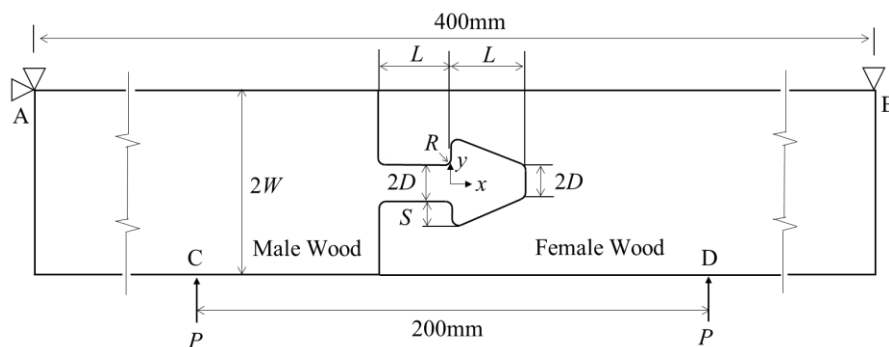


図 4-2 曲げを受ける鎌継手

表 4-2 鎌継手試験片寸法

単位[mm]					
$W$	$L$ ( $L^*$ )	$D$ ( $D^*$ )	$S$ ( $S^*$ )	$R$ ( $R^*$ )	$T$ ( $T^*$ )
20	25 (1.25)	10 (0.5)	4 (0.2)	1 (0.1)	Acrylic:2(0.1) Agathis:3 (0.15)

\* (カッコ内は、試験片幅  $W$  で除し無次元化したパラメータ)

### 4.3.2. 解析手順

解析手順を図 4-3 に示す.

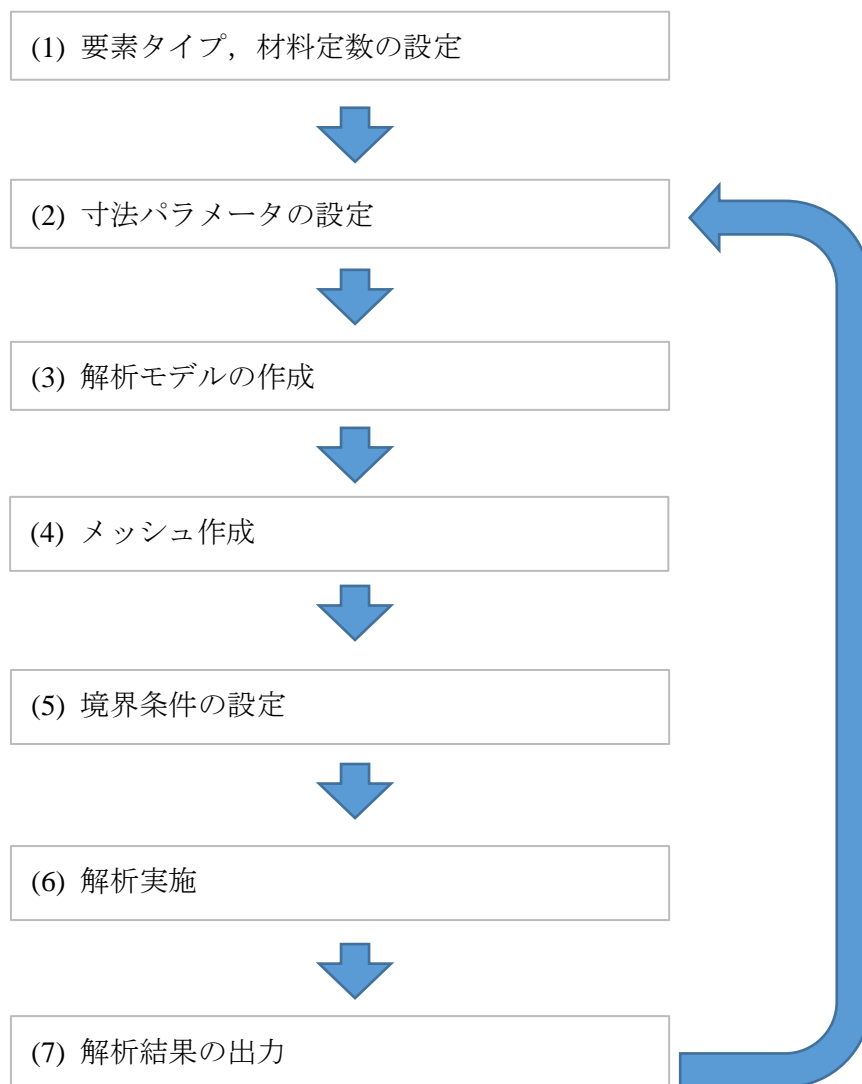


図 4-3 FEM による解析手順

- (1) 要素タイプは PLANE183 を選択する。PLANE183 は、6 節点(三角要素)または 8 節点 (四角要素) を持つ平面要素である。要素内の節点は x 方向, y 方向の 2 方向の自由度をもつ。この要素は、不規則な形状のメッシュ形状に適合する。試験片に用いる材質の材料定数を入力する。
- (2) 継手の寸法パラメータを入力する。
- (3) 解析モデルを作成する。解析モデルの作成に当たって、応力集中部のエリアについては、応力分布を正確に求めるため、他のエリアと分割してエリアを作成する。
- (4) 解析モデルのメッシュを生成する。応力集中部のメッシュ寸法は、既往の研究および筆者が行った予備解析 (付録参照) を基に、要素寸法の 1/100 としている。
- (5) 継手モデルの変位拘束及び荷重負荷を継手試験片の試験条件と同等となるよう設定する。また、継手試験片の両部材が接触する部分は、接触エリアとして設定する。
- (6) 解析を実施する。
- (7) 解析実施後、継手試験片の部材別のひずみ、応力成分のコンター図を作成する。また、応力集中部の各応力成分及び主応力の最大値を出力する。
- (8) 寸法パラメータと応力集中係数の関係を求めるため、(2)から(7)の手順を、寸法パラメータを段階的に変化させて解析を行う。この繰り返し手順は、寸法パラメータの範囲、ステップ値を予め設定し、自動的に行われる。



## 4.4 解析結果

### 4.4.1 等方性材料

曲げ荷重を受けるアクリル材継手試験片について、FEMにより求めた各応力成分の分布を図4-4～図4-7に示す。各応力成分の分布を見ると、継手上半分において、男木は鎌あご部の付け根、女木は鎌あご部先端に応力集中が生じており、応力分布は図3-19～図3-21及び図3-25に示す引張力が作用した場合の応力分布に近い。これは、継手上半分は、曲げにより引張応力が生じるためと考えられる。一方、継手下半分はほとんど応力集中が生じていない。これは、継手下半分は、曲げにより圧縮応力が生じるが、男木、女木の継手接触部が圧縮応力により密着するため、継手がない部材と同様、圧縮応力が一様に作用するためと考えられる。

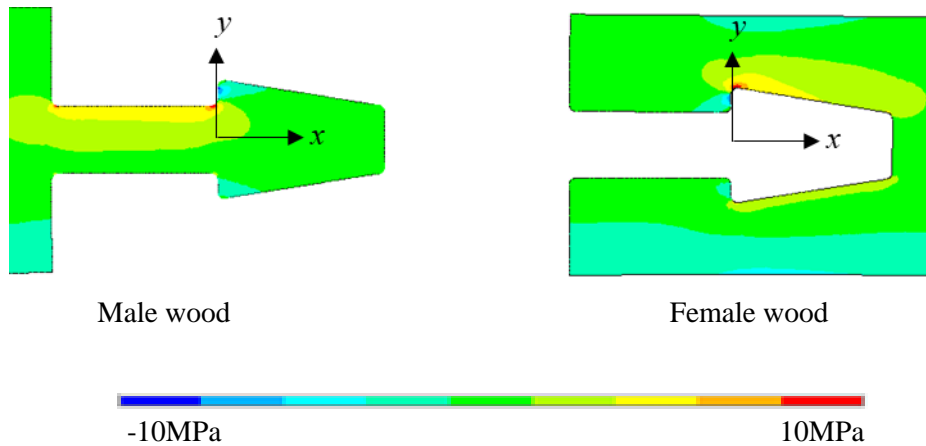


図4-4  $x$  方向垂直応力  $\sigma_x$  の分布 (アクリル試験片)

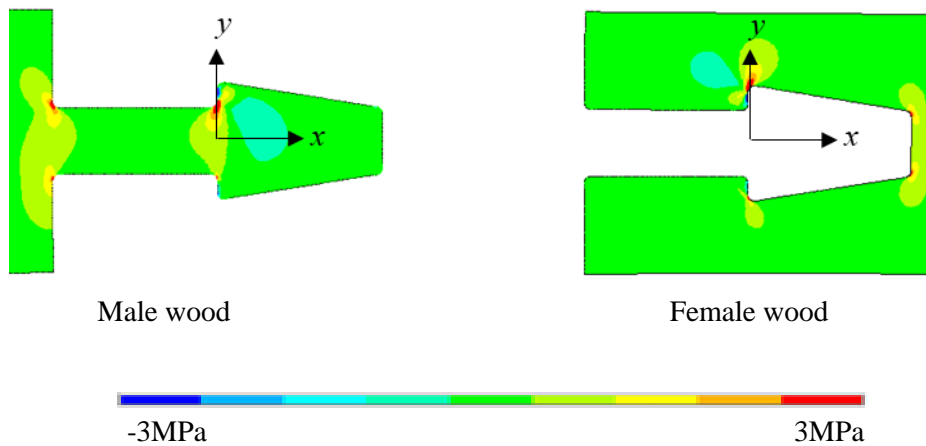


図4-5  $y$  方向垂直応力  $\sigma_y$  の分布 (アクリル試験片)

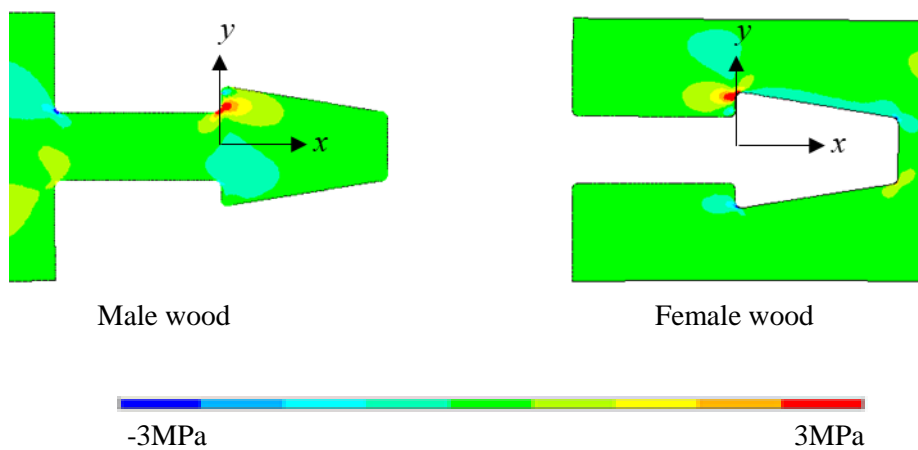


図 4-6 せん断応力  $\tau_{xy}$  の分布 (アクリル試験片)

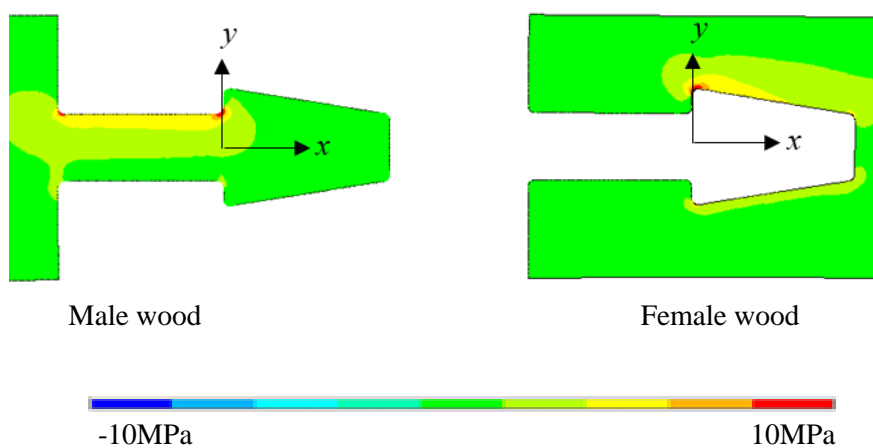


図 4-7 第一主応力  $\sigma_1$  の分布 (アクリル試験片)

#### 4.4.2 直交異方性材料

曲げ荷重を受けるアガチ材継手試験片について、FEMにより求めた各応力成分の分布を図4-8～図4-11に示す。各応力成分の分布を見ると、継手上半分において、男木は鎌あご部の付け根、女木は鎌あご部先端に応力集中が生じており、応力分布は図3-29～図3-31及び図3-35に示す引張力が作用した場合の応力分布に近い。また、継手下半分は、曲げにより圧縮応力が生じるが、男木、女木の継手接触部が圧縮応力により密着するため、継手下半分はほとんど応力集中が生じていない。

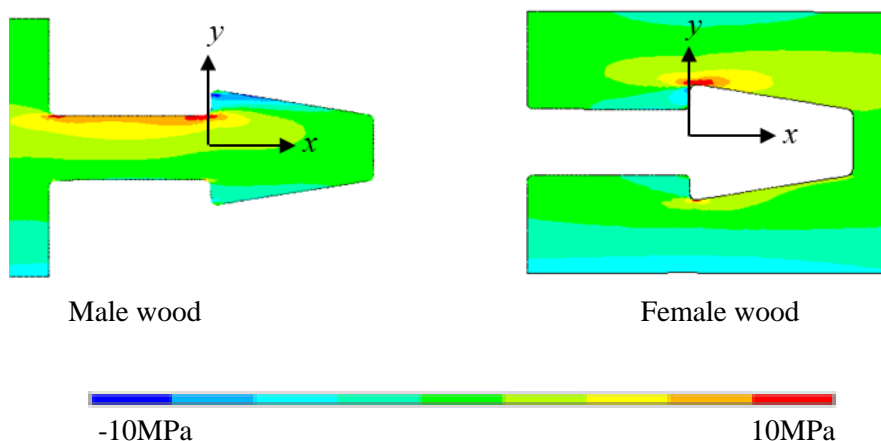


図4-8  $x$  方向垂直応力  $\sigma_x$  の分布 (アガチス試験片)

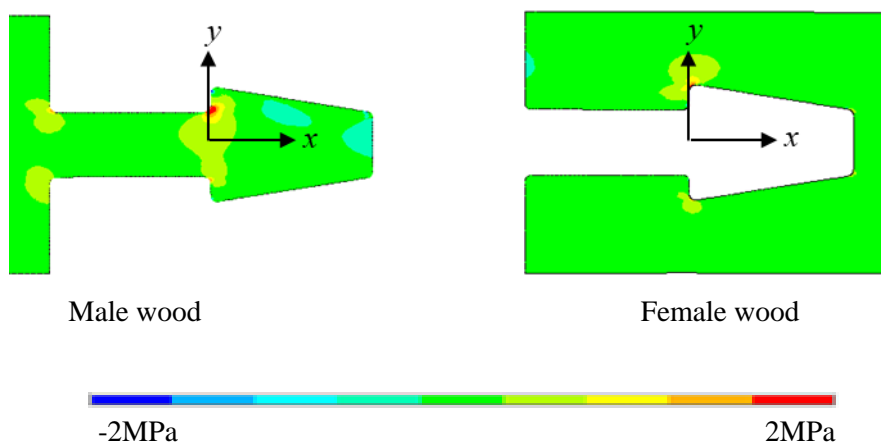


図4-9  $y$  方向垂直応力  $\sigma_y$  の分布 (アガチス試験片)

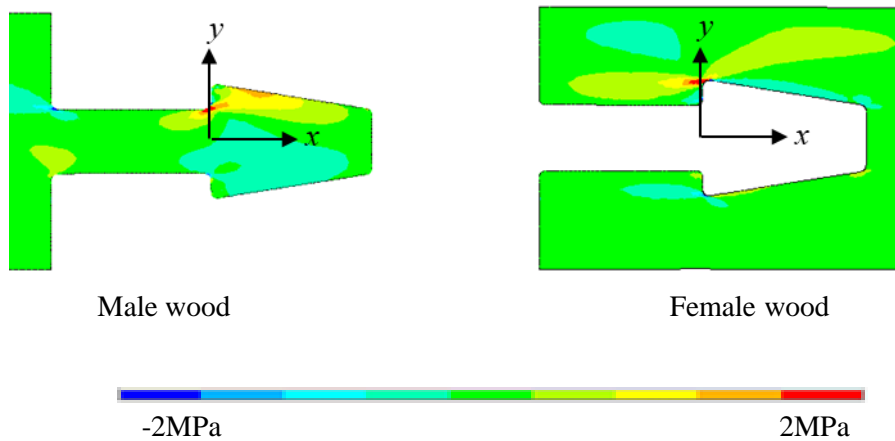


図 4-10 せん断応力  $\tau_{xy}$  の分布 (アガチス製試験片)

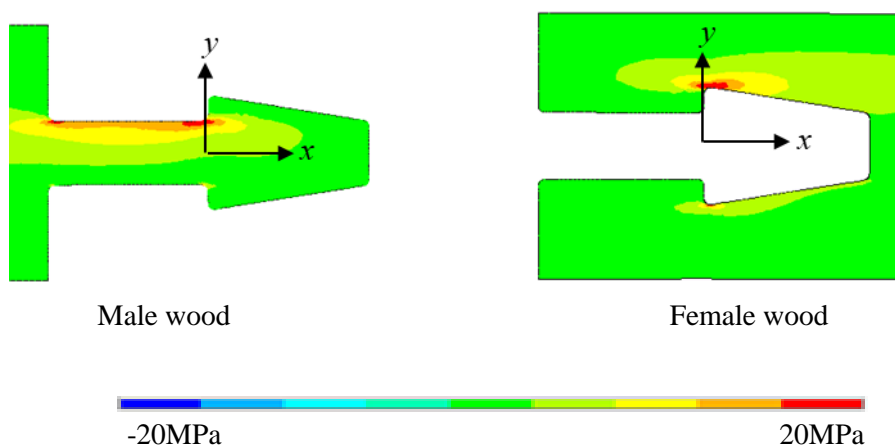


図 4-11 第一主応力  $\sigma_1$  の分布 (アガチス試験片)

## 4.5 継手応力集中係数計算式

### 4.5.1 鎌継手の応力集中係数

曲げを受ける場合の継手応力集中係数は、引張荷重を受ける場合と同様、以下の式で表される。

$$\alpha = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \quad \begin{array}{l} \alpha: \text{joint stress concentration factor of male or female wood} \\ \sigma_1: \text{maximum 1st principal stress of male or female wood} \\ \sigma_0: \text{nominal stress of test piece} \end{array} \quad (4.1)$$

ここで、 $\sigma_0$ は試験片上面部分に生じる最大曲げ応力とする。これは、試験片が一体である時、最大の引張応力が生じる試験片上縁で破壊が生じるためである<sup>(2)</sup>。鎌継手に曲げ荷重が作用するとき、図 4-12 に示すとおり、応力集中が生じる継手上半分は、引張の曲げ応力が作用する。曲げ応力の分布は、中立軸である中心軸で 0、上縁および下縁で最大となる。図 4-4～図 4-7 及び図 4-8～図 4-11 より、等方性材料、異方性材料において引張応力が作用する継手上半分では鎌顎部で応力集中が生じ、圧縮応力が生じる継手下半分では応力集中がほとんど生じていない。そこで、継手上半分について着目し、継手上半分に生じる曲げ応力が継手部近傍で均等に作用すると考えれば、次式の引張荷重に対する男木、女木の応力集中係数計算式が曲げを受ける鎌継手の応力集中係数として適用できると考えられる。

$$\begin{aligned} \alpha_m = & \left( c_{Dm} + a_{Dm} b_{Dm} \sqrt{\frac{S^* D^*}{R^* (a_{Dm}^2 S^* + b_{Dm}^2 D^*)}} \right) \frac{1}{D^*} \\ & + a_{Sm} \left( a_{Sm} b_{Sm} \sqrt{\frac{S^* D^*}{R^* (a_{Sm}^2 S^* + b_{Sm}^2 D^*)}} \right) \frac{1}{S^*} + a_{Mm} \sqrt{\frac{D^* 3S^*}{R^* L^2}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \alpha_f = & \left( c_{Df} + a_{Df} b_{Df} \sqrt{\frac{S^* D_f^*}{R^* (a_{Df}^2 S^* + b_{Df}^2 D_f^*)}} \right) \frac{1}{D_f^*} \\ & + a_{Sf} \left( a_{Sf} b_{Sf} \sqrt{\frac{S^* D_f^*}{R^* (a_{Sf}^2 S^* + b_{Sf}^2 D_f^*)}} \right) \frac{1}{S^*} + a_{Mf} \sqrt{\frac{D_f^* 3S^*}{R^* L^2}} \end{aligned} \quad (4.3)$$

式中の係数は、引張荷重の場合と同様、FEM を行ない、非線形最小二乗法によるカーブフィッティングにより FEM の結果に一致するよう決定する。

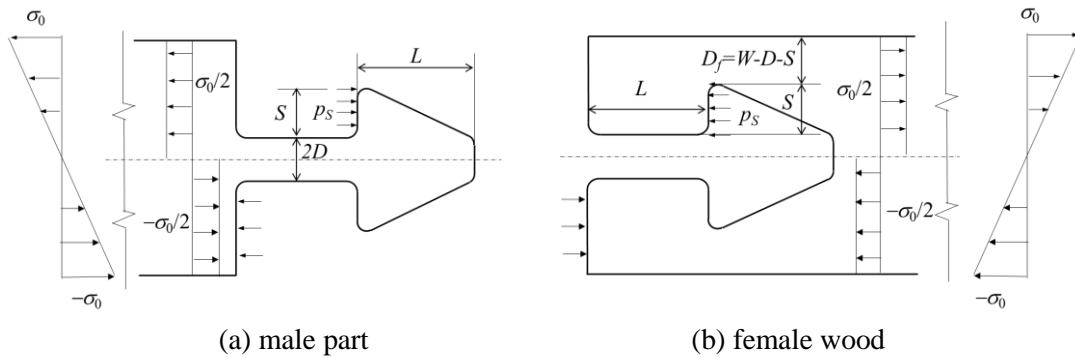


Fig.4-12 鎌継手が曲げを受けるときに継手内に生じる応力及び圧力

表 4-3 FEM におけるアクリル材鎌継手寸法パラメータ ( $W=20\text{mm}$ ).

Parameter	dimension parameter values
$L^*$	1.0, 1.25, 2.0, 3.0
$D^*$	0.0625, 0.125, 0.1875, 0.25, 0.3125, 0.375
$S^*$	0.2, 0.3, 0.4
$R^*$	0.025, 0.05, 0.075

表 4-4 曲げを受ける場合の応力集中係数計算式の係数

Male part		Female part	
$a_{Dm}$	0.996	$a_{Df}$	3.377
$b_{Dm}$	0.494	$b_{Df}$	1.206
$c_{Dm}$	0.111	$c_{Df}$	1.525
$a_{Sm}$	0.652	$a_{Sf}$	0.293
$b_{Sm}$	1.617	$b_{Sf}$	0.591
$a_{Mm}$	0.455	$a_{Mf}$	0.271

#### 4.5.2 等方性材料の継手応力集中係数

等方性材料であるアクリル材鎌継手について、表 4-3 に示す各寸法パラメータの全ての組み合わせ 216 通りに対して FEM を行う。得られた継手応力集中係数結果と計算式 (4.2), (4.3) をカーブフィッティングして求めた係数を表 4-4 に示す。式 (4.2), 式 (4.3) の適用範囲は、FEM を行った寸法の範囲とし、 $L^*=1\sim 3.75$ ,  $D^*=0.0625\sim 0.375$ ,  $S^*=0.2\sim 0.4$ ,  $R^*=0.025\sim 0.075$  とする。

図 4-13～4-16 は、曲げ荷重を受ける場合の係数を計算式 (4.2), (4.3) に代入し、得られる継手応力集中係数  $\alpha_m$ ,  $\alpha_f$  と各パラメータとの関係である。実線は計算式、記号は FEM の結果を示している。各パラメータに対する継手応力集中係数の変化は、引張荷重下での変化と同様である。このことから、曲げ荷重により生じる応力集中は、引張荷重を受

ける場合と同様に、継手肩部の接触圧力により生じていると考えられる。曲げを受けるときの継手応力集中係数は、男木、女木共に引張を受ける場合に比べて小さい。これは、引張を受ける場合では、試験片には平均に作用する引張応力は、継手応力集中係数の公称応力である $\sigma_0$ である。一方、曲げの継手応力集中係数の公称応力は上縁の引張応力 $\sigma_0$ としているが、継手内の引張応力は、継手中心で0、継手上縁で $\sigma_0$ となり平均的には $\sigma_0/2$ となり引張を受ける場合に比べて小さいためと考える。また、引張を受ける場合に比べて、男木と女木の継手応力集中係数の差が少ない。これは、継手部根本で男木と女木の接触部が拘束されていないため、曲げを受ける時女木端部が上方に開き、曲げ応力が男木に比べて相対的に小さくなっていると考えられる。

計算式の FEM に対する誤差は、一部領域で最大 15%ほどあるが、図中に記号で示している FEM との誤差は、男木、女木共に平均で約 5%である。従って、曲げ荷重を受ける場合についても提案する継手応力集中係数の計算式により、数%程度の誤差で、継手応力係数を算出することができる。

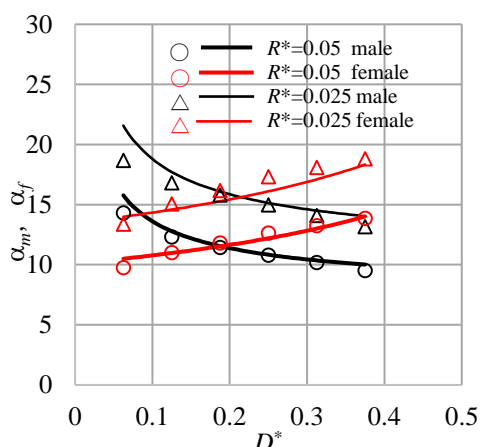


図 4-13  $L^*=1.25, S^*=0.2, R^*=0.05, 0.025$  のときの継手応力集中係数  $D^*$  の関係 (アクリル試験片, 線:計算式, 記号:FEM)

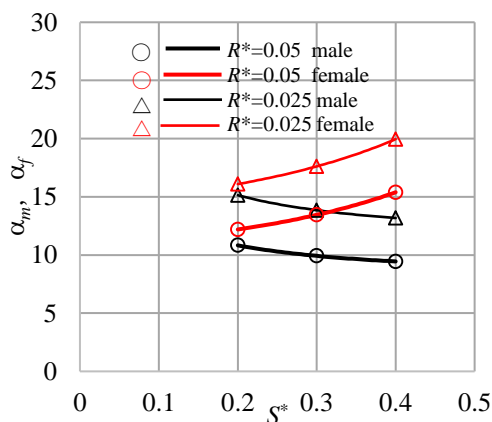


図 4-14  $L^*=1.25, D^*=0.25, R^*=0.05, 0.025$  のときの継手応力集中係数  $S^*$  の関係 (アクリル試験片, 線:計算式, 記号:FEM)

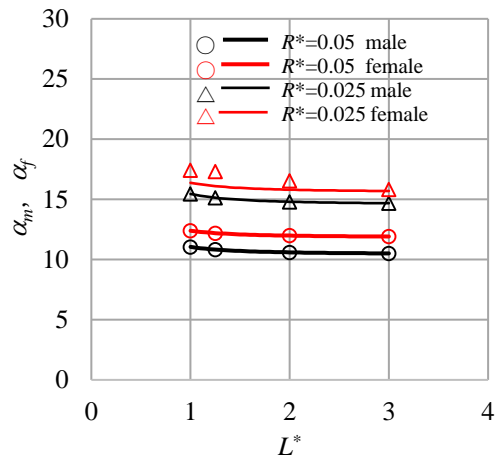


図 4-15  $D^*=0.25, S^*=0.2, R^*=0.05, 0.025$  のときの継手応力集中係数  $L^*$  の関係  
(アクリル試験片, 線:計算式, 記号: FEM)

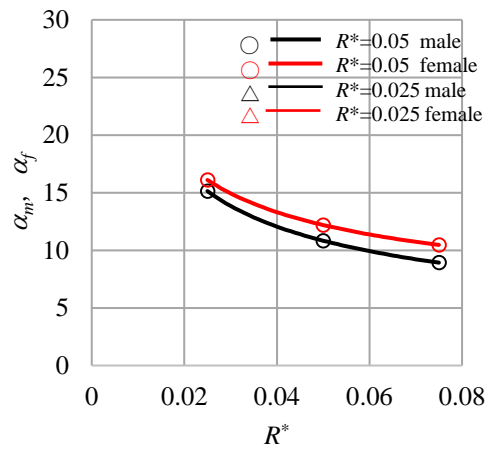


図 4-16  $L^*=1.25, D^*=0.25, S^*=0.2$  のときの継手応力集中係数  $R^*$  の関係  
(アクリル試験片, 線:計算式, 記号: FEM)



### 4.5.3 直交異方性材料の継手応力集中係数

直交異方性材料であるアガチス材鎌継手について、表 4-5 に示す各寸法パラメータの全ての組み合わせ 216 通りに対して FEM を行う。得られた継手応力集中係数結果と式 (4.2), (4.3) をカーブフィッティングして求めた係数を表 4-6 に示す。式(4.2), 式(4.3)の適用範囲は, FEM を行った寸法の範囲とし,  $L^*=1\sim 3.75$ ,  $D^*=0.0625\sim 0.375$ ,  $S^*=0.2\sim 0.4$ ,  $R^*=0.025\sim 0.075$  とする。

図 4-17~4-20 は, 曲げ荷重を受ける場合の係数を計算式(4.2), (4.3)に代入し, 得られる継手応力集中係数 $\alpha_m$ ,  $\alpha_f$ と各パラメータとの関係である。実線は計算式, 記号は FEM の結果を示している。各パラメータに対する継手応力集中係数の変化は, 異方性材料の継手試験片においても引張荷重下での変化と同様である。また, 異方性材料であるアガチス材では, 継手試験片が等方性材料の場合に比べて, 継手応力集中係数が 2~3 倍となっている。これは, 異方性材料で引張方向の縦弾性係数が横方向の縦弾性係数より大きい場合, 応力集中係数が大きくなるためである。

計算式の FEM に対する誤差は, 一部領域で最大 20%ほどあるが, 図中に記号で示している FEM との誤差は, 男木, 女木共に平均で約 5%程度である。従って, 曲げ荷重を受ける場合についても提案する継手応力集中係数の計算式により, 数%程度の誤差で, 継手応力係数を算出することができる。

表 4-5 FEM におけるアガチス材鎌継手寸法パラメータ (W=20mm)。

Parameter	dimension parameter values
$L^*$	1.0, 1.25, 2.0, 3.0
$D^*$	0.0625, 0.125, 0.1875, 0.25, 0.3125, 0.375
$S^*$	0.2, 0.3, 0.4
$R^*$	0.025, 0.05, 0.075

表 4-6 曲げを受ける場合の応力集中係数計算式の係数

Male part		Female part	
$a_{Dm}$	1.615	$a_{Df}$	4.957
$b_{Dm}$	0.842	$b_{Df}$	4.465
$c_{Dm}$	0.013	$c_{Df}$	-0.309
$a_{Sm}$	1.277	$a_{Sf}$	0.951
$b_{Sm}$	3.531	$b_{Sf}$	2.841
$a_{Mm}$	3.189	$a_{Mf}$	3.402

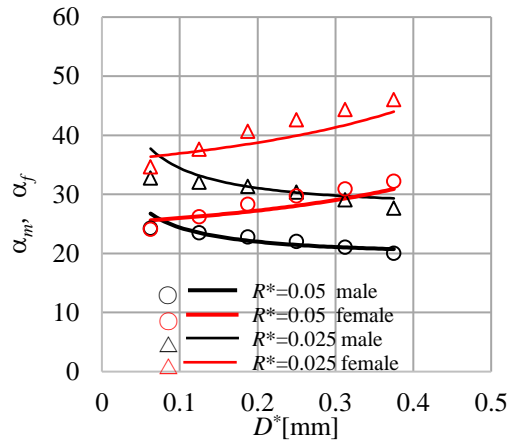


図 4-17  $L^*=1.25, S^*=0.2, R^*=0.05, 0.025$  のときの継手応力集中係数  $D^*$  の関係 (アガチス試験片, 線:計算式, 記号:FEM).

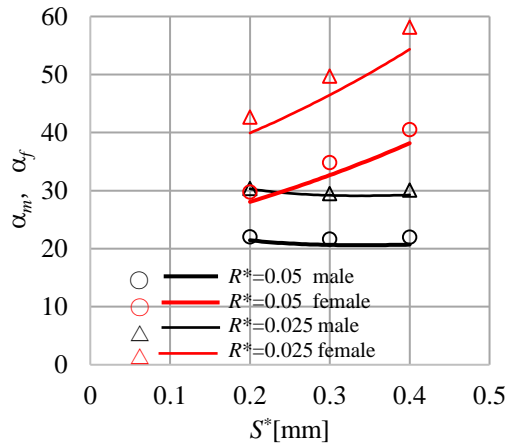


図 4-18  $L^*=1.25, D^*=0.25, R^*=0.05, 0.025$  のときの継手応力集中係数  $S^*$  の関係 (アガチス試験片, 線:計算式, 記号:FEM)

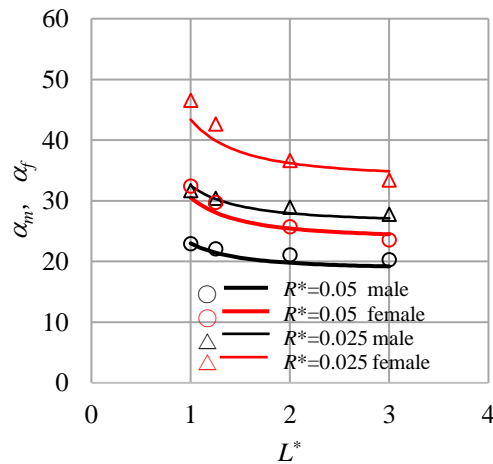


図 4-19  $D^*=0.25, S^*=0.2, R^*=0.05, 0.025$  のときの継手応力集中係数  $L^*$  の関係 (アガチス試験片, 線:計算式, 記号:FEM)

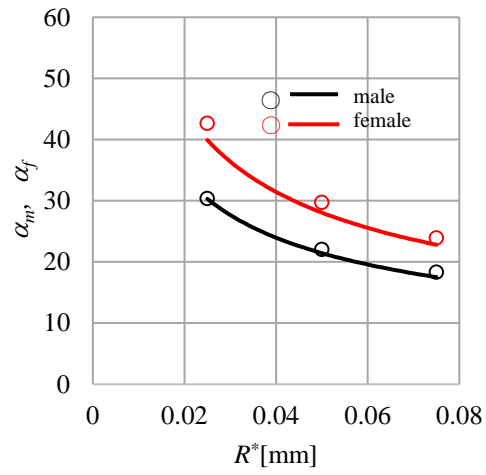


図 4-20  $L^*=1.25, D^*=0.25, S^*=0.2$  のときの継手応力集中係数  $R^*$  の関係  
(アガチス材試験片, 線:計算式, 記号:FEM)

## 4.6 曲げ荷重を受ける場合の継手応力集中係数を最小とする形状

### 4.6.1 等方性材料

曲げ荷重に対して最大主応力を最小にする形状として鎌継手の最適寸法を計算式から求める。  $L^*=0.25$  で固定したとき、計算式(4.2), (4.3)より得られる継手応力集中係数  $\alpha_m, \alpha_f$  の大きい方が最小となる、 $D^*, S^*, R^*$  の組み合わせを一般化簡約勾配法 (GRG 法) で求めた。なお、 $D^*, S^*, R^*$  のとる値は、表 4-3 に示す FEM を行った範囲としている。 $D^*=0.17, S^*=0.2, R^*=0.075$  において最小値をとり、継手応力集中係数は  $\alpha_m=9.77, \alpha_f=9.72$  を得ている。従来の形状  $D^*=0.125, S^*=0.05$  で継手応力集中係数は、 $\alpha_m=15.14, \alpha_f=16.10$  であり、最適寸法の継手応力集中係数は従来の形状に対して約 40% 小さくなっている。図 4-21 に FEM により計算した最適寸法および従来の形状の主応力分布を示す。FEM から求めた最適寸法の継手応力集中係数は、 $\alpha_m=9.92, \alpha_f=9.28$  で計算式から求めた値とほぼ等しい。最適寸法と従来形状の主応力分布を比べると最適寸法は男木部鎌首部、女木部鎌あご部に作用する最大主応力が均等となり、継手全体の応力集中係数が小さくなっていることがわかる。

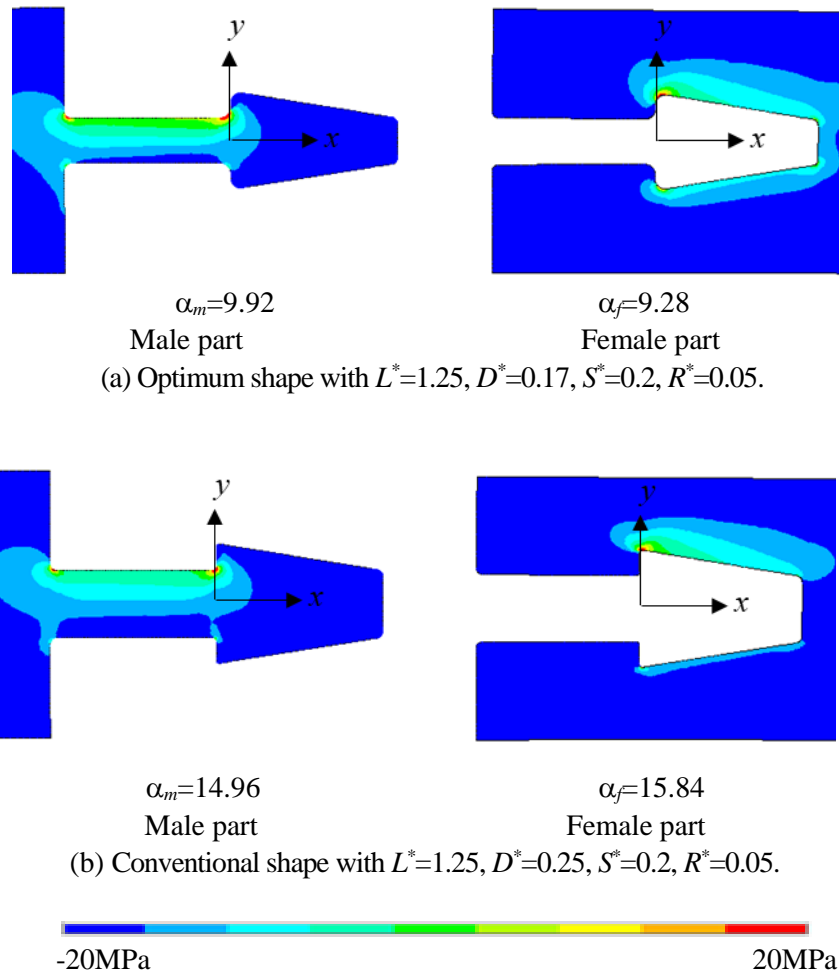


図 4-21 最適寸法と従来形状の比較（等方性材料）

#### 4.6.2 直交異方性材料

曲げ荷重に対して最大主応力を最小にする形状として鎌継手の最適寸法を計算式から求める。  $L^*=1.25$  で固定したとき、計算式(4.2)、(4.3)より得られる継手応力集中係数  $\alpha_m, \alpha_f$  の大きい方が最小となる、  $D^*, S^*, R^*$  の組み合わせを一般化簡約勾配法（GRG法）で求めた。なお、  $D^*, S^*, R^*$  のとる値は、表 4-5 に示す FEM を行った範囲としている。従来形状および引張及び曲げに対する最適寸法を図 4-22 に示す。引張荷重、曲げ荷重に対する最適寸法は、ほぼ同じ形状となっており、引張及び曲げ荷重に対する継手応力集中係数もほぼ同じ値となっている。これは、引張及び曲げ荷重が作用すると、継手部には共に引張応力が生じ、同様の応力集中が生じるためであると考えられる。



(a) conventional shape  
 $(L^*=1.25, D^*=0.25, S^*=0.2, R^*=0.025)$



(b) Optimum shape against bending load  
 $(L^*=1.25, D^*=0.075, S^*=0.2, R^*=0.075)$



(c) Optimum shape against tensile load  
 $(L^*=1.25, D^*=0.0625, S^*=0.2, R^*=0.075)$

図 4-22 従来形状及び引張に対する最適寸法 (アガチス材)

表 4-7 引張及び曲げを受ける場合の最適寸法および従来形状の継手応力集中係数

		$\alpha_m, \alpha_f$ under tensile load		$\alpha_m, \alpha_f$ under bending load	
		$\alpha_m$	$\alpha_f$	$\alpha_m$	$\alpha_f$
Conventional shape ( $L^*=1.25, D^*=0.25,$ $S^*=0.2, R^*=0.025$ )	CAL	47.9	86.2	30.3	39.9
	FEM	49.5	88.0	30.2	42.5
Optimum shape against tensile load ( $L^*=1.25, D^*=0.0625,$ $S^*=0.2, R^*=0.075$ )	CAL	41.9	45.2	21.9	20.8
	FEM	42.5	45.5	20.7	19.4
Optimum shape against bending load ( $L^*=1.25, D^*=0.089,$ $S^*=0.2, R^*=0.075$ )	CAL	38.9	45.4	21.1	20.9
	FEM	39.0	45.7	20.2	19.6

表 4-7 に引張及び曲げを受ける場合の最適寸法および従来形状の継手応力集中係数を示す。曲げ荷重に対しては、 $D^*=0.075, S^*=0.2, R^*=0.075$  において最小値をとり、継手応力集中係数は $\alpha_m=21.1, \alpha_f=20.9$  で、従来形状における継手応力集中係数 $\alpha_m=30.3, \alpha_f=39.9$  に対して約半分となっている。また、この最適寸法について、引張荷重を加えたときの継手応力集中係数は、 $\alpha_m=38.9, \alpha_f=45.4$  で、従来形状における継手応力集中係数 $\alpha_m=47.9, \alpha_f=86.2$  に対して約半分となっている。このことから、曲げ荷重に対する最適寸法は引張荷重に対しても強くなる。

図 4-23 に、FEM による曲げ荷重に対する最適寸法、従来形状の主応力分布を示す。最適寸法と従来形状の主応力分布を比べると、最適寸法は、男木部鎌首部、女木部鎌あご部に作用する最大主応力が共に低下し、かつ、男木と女木で均等となり、継手全体の応力集中係数が小さくなっていることがわかる。

図 4-24 に、FEM による曲げ荷重に対する最適寸法、従来形状の主応力分布を示す。最適寸法と従来形状の主応力分布を比べると、引張荷重と同様、最適寸法は、継手上半分の男木部鎌首部、女木部鎌あご部に作用する最大主応力が共に低下し、かつ、男木と女木で均等となり、継手全体の応力集中係数が小さくなっていることがわかる。

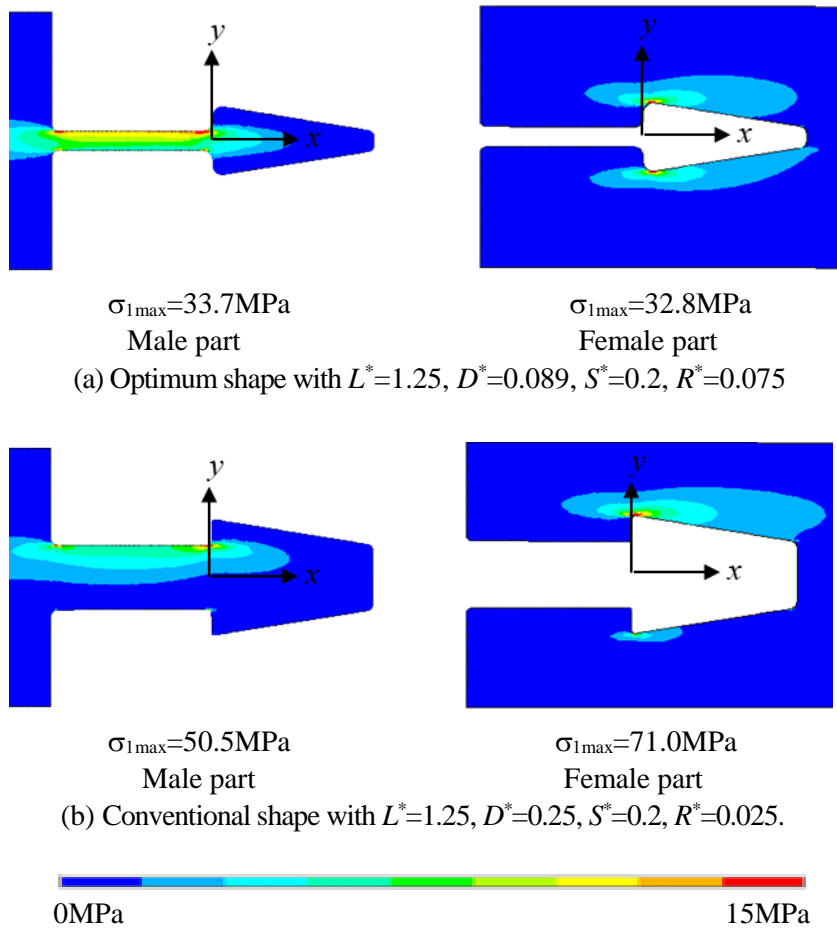


図 4-23 曲げ荷重を受けるときの最適寸法と従来形状の第一主応力  
 (アガチス材  $P=8.9\text{N}$ )



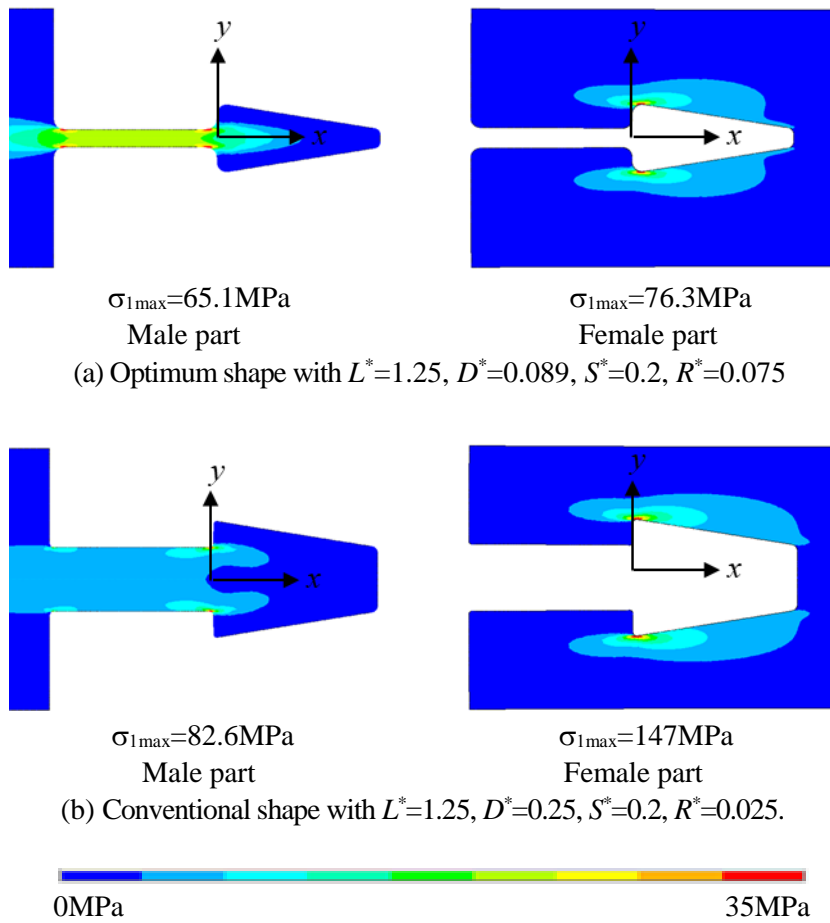


図 4-23 引張荷重を受けるときの最適寸法と従来形状の第一主応力  
(アガチス材  $\sigma_0=1.67\text{MPa}$ )

## 4.7 まとめ

本章では、鎌継手が曲げを受ける場合における応力解析を FEM を行い、継手部の応力集中について検討した。継手上半において、男木は鎌あご部の付け根、女木は鎌あご部先端に応力集中が生じており、応力分布は引張力が作用した場合の応力分布に近い。これは、継手上半分は、曲げにより引張応力が生じるためと考えられる。一方、継手下半分はほとんど応力集中が生じていない。これは、継手下半分は、曲げにより圧縮応力が生じるが、男木、女木の継手接触部が圧縮応力により密着するため、継手がない部材と同様、圧縮応力が一様に作用するためと考えられる。次に、寸法パラメータを変えて応力解析を行い、曲げ荷重について男木部、女木部各々に対する継手応力集中係数を算出する計算式を提案した。提案した式は、FEM との平均誤差が 3~5% 程度の誤差であった。

提案した計算式を用いて、曲げ荷重を受ける鎌継手に生じる応力集中係数を最小にする最適寸法を求めた。曲げ荷重に対する最適寸法は、ほぼ引張に対する最適寸法と同形状であった。これは、引張及び曲げ荷重が作用すると、継手部には共に引張応力が生じ、同様の応力集中が生じるためであると考えられる。このことから、引張に対する最適寸法は、曲げ荷重に対する継手応力集中係数も同様に減少させることを確認した。

## 参考文献

- (1) 森林総合研究所監修，改訂4版 木材工業ハンドブック(2004)，p.129，丸善出版.
- (2) 桑村仁，木材の割裂破壊とクラフトグラフィー鉄骨木質構造の研究 その6ー，日本建築学会構造系論文集，Vol.75，No.650(2010)，pp.831-838.

## 5章 熱負荷を受けるときの継手部の熱応力解析

### 5.1 緒論

3章, 4章では, 引張及び曲げを受ける鎌継手について, 応力解析を行ない継手内の応力分布や応力集中を明らかにした. そのうえで, 2章で提案した応力集中係数計算式を基に任意の継手寸法パラメータから継手応力集中係数を求める計算式を提案し, 提案した計算式から継手応力集中係数を最小とする形状を求めた.

木材の熱膨張は, 部材の長手方向である繊維方向の線膨張係数は金属材料に比べて小さく, また, 木材中の含有水分による寸法変化に比べて著しく小さいため, 熱膨張が木材の強度に与える影響は実用上問題となるとは考えられていなかった<sup>(4)</sup>.

一方で, 部材の幅方向である繊維方向の線膨張係数は金属材料と同等程度である. また, 部材の幅方向の線膨張係数は木造建築の継手部は, 直射日光による熱負荷や室内外温度差により, 継手部内に温度勾配が生じ, 熱ひずみや熱応力が生じる可能性がある. 継手部に熱応力が発生した場合, 引張や曲げを受ける場合と同様, 継手部に応力集中が発生し, 継手部のない一体の部材に比べて大きな熱応力が発生する可能性がある. 引張荷重や曲げ荷重を受ける継手が, 同時に熱応力による応力集中を受ける場合, 継手の引や曲げ強度に影響を及ぼすことが考えられる. このため, 熱負荷を受けるときの継手内の応力分布や応力集中係数を明らかにすることは, 継手が用いられる環境条件における正確な強度を求めるために重要であると考えられる.

本章では, 継手部に熱負荷が作用したときに継手部に生じる熱ひずみ及び熱応力を解析し, 熱応力が引張強度に与える影響を明らかにする.

熱ひずみ解析は, 熱負荷が与えられた継手について DIC による熱ひずみ分布およびサーモグラフィによる温度分布を観察し, これらの結果から熱ひずみを測定する. 次に, FEM において, 解析モデルを熱負荷試験に適合するよう設定し, 構造-伝熱の連成解析を行う. 両者のひずみ解析結果を比較検討することで, 両解析の妥当性を検証する. そのうえで, FEM により熱応力分布を求めている.

## 5.2 DIC 解析による熱ひずみ解析

### 5.2.1 継手試験片

解析対象とする継手形状は、引張試験と同じ鎌継手とし、試験片の形状を図 5-1 に示す。試験片材質については、等方性材料としてアクリル材、直交異方性材料としてアガチス材を選択する。アガチス材は、試験片長手方向( $x$  軸方向)を繊維方向、継手幅方向 ( $y$  方向) が年輪接線方向とする。継手試験片の作製方法は、引張試験の試験片作成方法と同様である。

各材質の熱伝導率 $\lambda$ を表 5-1 に示す。アクリル材の熱伝導は等方性で、熱伝導率はメーカー仕様値<sup>(2)</sup>を参照している。アガチス材の熱伝導は異方性を有し、繊維方向の熱伝導率 $\lambda_L$ は、繊維直交方向(年輪半径方向及び接線方向)の熱伝導率 $\lambda_T$ の 2.25~2.75 倍である<sup>(3)</sup>。本論文では、 $\lambda_L$ を $\lambda_T$ の 2.5 倍としている。 $\lambda_L$ は文献値<sup>(4)</sup>より 0.13[W/mK]、 $\lambda_T$ は $\lambda_L$ の値を 2.5 で除し 0.052[W/mK]としている。

線膨張係数は、アクリル、アガチス材ともに、本章で行う熱負荷試験から求めている。

### 5.2.2 熱応力試験

#### 5.2.2.1 熱負荷条件

継手部の加熱範囲は図 5-1 に示すとおり、男木試験片から男木頭部半分まで加熱する。

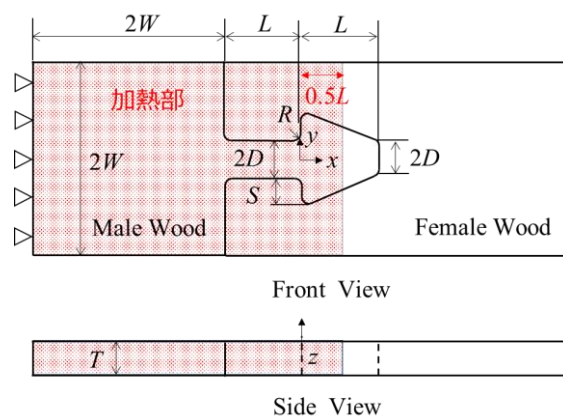


図 5-1 継手部の加熱範囲

表 5-1 試験片材料の熱伝導率

	$\lambda$ [W/m K]	
	アクリル	0.21
アガチス	$\lambda_L$ [W/m K]	$\lambda_T$ [W/m K]
	0.13	0.052

### 5.2.2.2 試験装置

試験装置は、図 5-2 に示すように継手に熱負荷を加える熱負荷装置及び DIC 解析装置からなる。図 5-3 に試験装置一式の写真を示す。

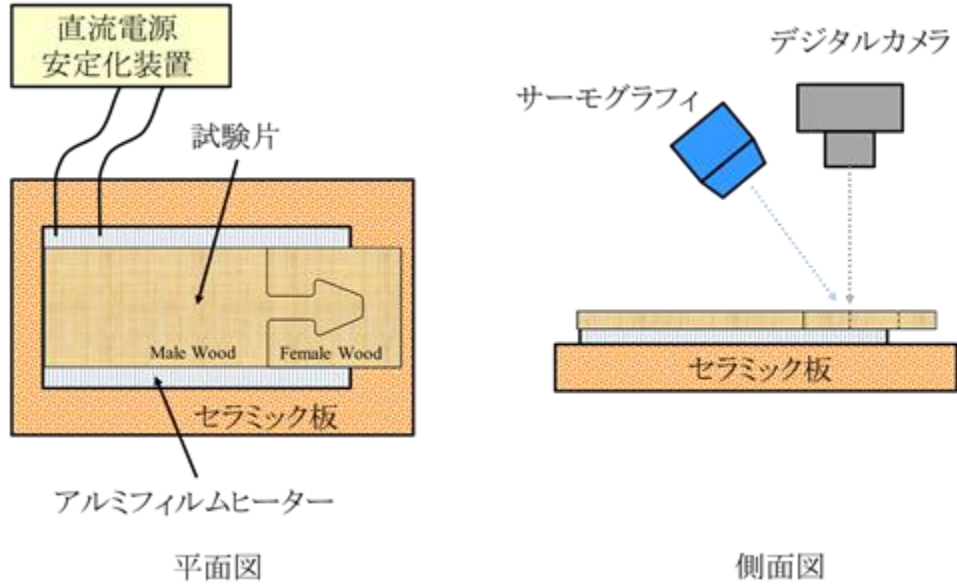


図 5-2 試験装置構成

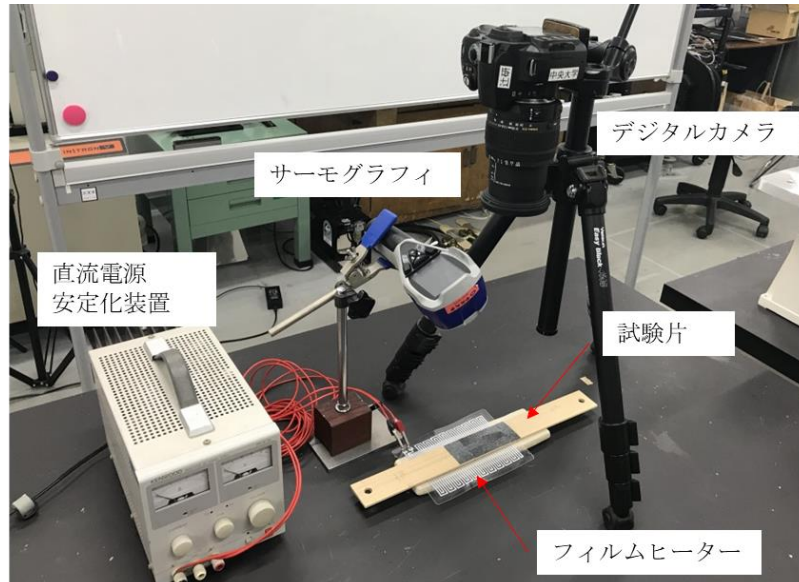


図 5-3 試験装置写真

(1) 加熱装置

試験片に熱負荷を与える加熱装置は、試験片を加熱するアルミフィルムヒーター及び加熱温度を制御する直流電源装置から構成される。試験装置の仕様を表 5-2 示す。

(2) DIC 試験装置

DIC 試験装置の構成及び仕様を表 5-3 に示す。

表 5-2 熱負荷装置仕様

アルミフィルムヒーター	ヒータ特性		表面温度[°C]	電流[A]	消費電力[A]
			38.0	1.6	6.0
			48.0	2.2	10.9
	95.0	3.9	35.2		
寸法[mm]		154×111×0.3			
メーカー・型番		ミライテック・AL-DC-A6-30			
直流電源安定化装置	電圧	出力	0~36V		
		入力変動	0.01%+2mV		
		出力変動	0.01%+2mV		
	電流	出力	0~3A		
		入力変動	2mA		
		出力変動	15mA		
	電源		AC100V±10%		
	メーカー・型番		KENWOOD PR36-3A		

表 5-3 DIC 解析装置の仕様

デジタルカメラ	メーカー・型番		ニコン D40X
	レンズ		シグマ光機 18-300mm F3.5-6.3 (2x テレコンバーター装着)
	設定	F 値	10
		シャッタースピード	1/2 s
LED 照明	メーカー・型番		NEEWER NL480
	台数		1 台
DIC 解析ソフト	ソフト名		Ncorr(ver.2.1)
	設定	サブセット半径	30pixel
		サブセット間隔	2pixel
		ひずみ半径	5pixel

(3) サーモグラフィ

サーモグラフィは， testo 社 875-1i を用いている． 機器の仕様を表 5-4 のとおりである．

表 5-4 サーモグラフィ仕様

測定温度範囲	0~350°C
温度感度	0.05°C
最小焦点距離	0.1m
検出測定素子	2次元非冷却マイクロボロメータ
画素数	160×120(超解像 SupreResolution 機能使用時 320×240)
メーカー・型番	testo 社 875-1i



### 5.2.3 試験手順

DIC による熱ひずみ解析の手順を，図 5-4 に示す．

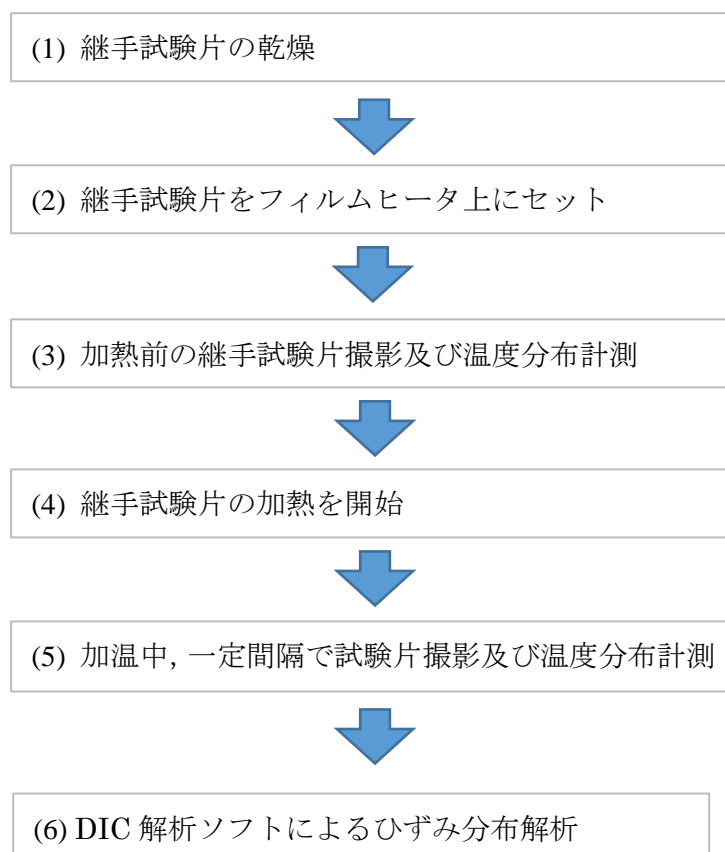


図 5-4 DIC による熱ひずみ解析の手順

各手順の詳細は、以下のとおりである。

(1) 継手試験片の乾燥

木材は、温度による収縮・膨張に加えて、含水率の変化により大きく膨張・収縮する。そこで、含水率による伸縮・膨張を防ぐため、継手試験片を電気乾燥炉内で十分乾燥させる。電気乾燥炉内の温度は、加熱試験の最高温度である 60°C とする。

(2) 継手試験片のセット

継手試験片をアルミフィルムヒーター上に載せる。このとき加熱する部分をヒーター上に載せる。

(3) 加熱前の継手試験片撮影

無負荷状態の継手試験片の画像を撮影する。撮影手順は、引張試験のときと同様である。同時に、継手試験片の温度分布をサーモグラフィで計測する。デジタルカメラの撮影画像とサーモグラフィの温度分布の座標の原点を一致させる。

(4) 継手試験片への荷重負荷

直流電源装置の出力を調整して継手試験片を加熱させる。出力調整のスケジュールは下記の表のとおりである。

(5) 加熱時の継手試験片撮影

継手試験片が 5°C 昇温する毎に継手試験片の撮影と温度分布の計測を行う。試験片の代表点の温度が 60°C に達したところで、最終の撮影と温度分布の計測を行い、試験片の加熱を停止する。

(6) DIC によるひずみ分布解析

DIC による熱ひずみ分布を計測する。DIC 解析手順は、引張試験のときと同様である。

### 5.3 FEM 解析による熱応力解析

平面応力問題として、男木部と女木部をはめ合うようモデルを作成し、継手部を接触領域として接触弾性解析を行っている。解析コードは、ANSYS を用いている。

解析手順は図 5-5 のとおりである。

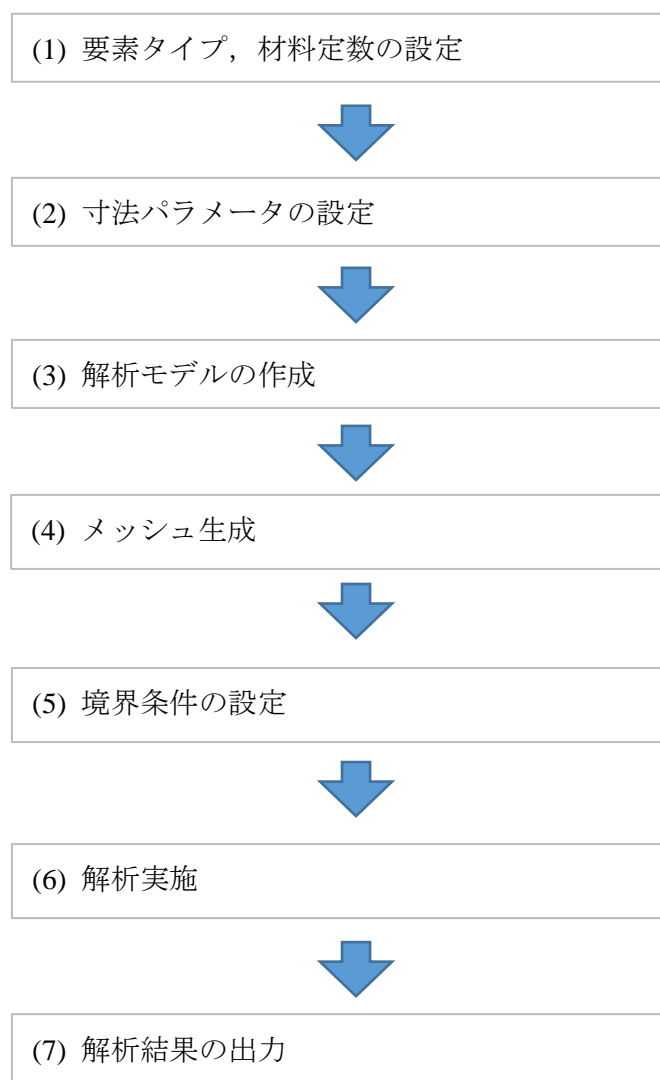


図 5-5 FEM による熱応力解析手順

各手順の詳細は、以下のとおりである。

(1) 要素タイプ，材料定数の設定

要素タイプは PLANE223 を選択する。PLANE223 は、6 節点(三角要素)または 8 節点(四角要素)を持つ平面要素である。要素内の節点は  $x$  方向， $y$  方向の 2 方向の自由度をもつ。この要素は、構造解析と熱伝導解析の連成解析を行うことができる。試験片に用いる材質の材料定数を入力する。

(2) 寸法パラメータの設定

継手の寸法パラメータを入力する。

(3) 解析モデルの作成

解析モデルを作成する。解析モデルの作成に当たって、応力集中部のエリアについては、応力分布を正確に求めるため、他のエリアと分割してエリアを作成する。

(4) メッシュ生成

解析モデルのメッシュを生成する。応力集中部のメッシュ寸法は、既往の研究および筆者が行った予備解析を基に、要素寸法の 1/100 としている。

(5) 境界条件の設定

継手モデルの加熱部分および試験片外縁の対流熱伝達を設定する。加熱部分は、領域内の全節点の温度を初期温度から最終温度まで一様に昇温させる。また、試験片外縁の対流熱伝達については、熱伝達係数を  $10[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$ <sup>(5)</sup>、雰囲気温度を  $20^\circ\text{C}$  とする。また、継手試験片の両部材が接触する部分は、接触エリアとして設定する。なお、接触エリアの摩擦については、アクリル材は無視し、アガチス材は静止摩擦係数を 0.5 としている。<sup>(6)</sup> 接触熱伝導は、 $400[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$  としている。

(6) 解析実施

解析を実施する。

(7) 解析結果の出力

解析実施後、継手試験片の部材別のひずみ、温度分布、ひずみ分布、各応力成分のコンター図を作成する。また、応力集中部の各応力成分及び主応力の最大値を出力する。

## 5.4 解析結果

本項では、5.3 及び 5.3 で示した手順に従い、DIC 及び FEM を行い得られた結果について説明する。

### 5.4.1 試験片の線膨張係数

図 5-6 に示すアクリル材及びアガチス材試験片の領域 A における  $x$  方向(繊維方向)及び  $y$  方向(年輪接線方向)の温度とひずみの関係を図 5-7 に示す。アクリル試験片については、 $x$  軸方向及び  $y$  軸方向のひずみ変化はほぼ同様である。これは、アクリル材が等方性であるためである。アクリル材の線膨張係数  $\alpha$  は、最小二乗法により求めた線形近似曲線の傾きから求められ、 $\alpha_x=71[10^{-5}/^{\circ}\text{C}]$ 、 $\alpha_y=66[10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$  が得られる。得られた値は、メーカー仕様の値  $70[10^{-6}/^{\circ}\text{C}]^{(1)}$  とほぼ一致することから、DIC により線膨張係数は精度よく計測できることが確認できる。

アガチス材については、年輪接線方向である  $y$  方向のひずみ増加量が  $x$  軸に比べて大きい。これは、木材は繊維方向に比べて繊維垂直方向に大きく熱ひずみが生じるためである。線膨張係数は、線形近似曲線の傾きより  $\alpha_x=1.7[10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$ 、 $\alpha_y=31[10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$  が得られる。



図 5-6 熱ひずみ計測領域

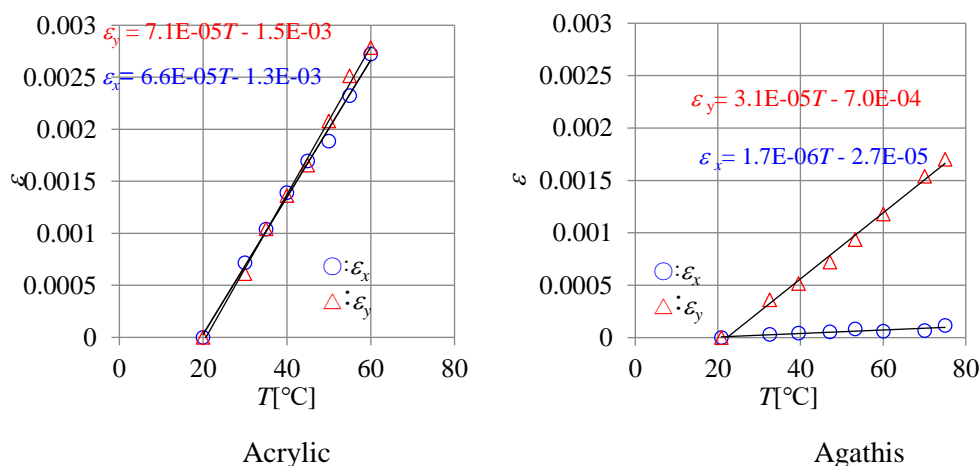


図 5-7 試験片温度と垂直ひずみの関係

Whethermax らは数種の樹種の線膨張係数を求め、 $\alpha_x=3\sim 4[10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$ 、 $\alpha_y=30\sim 40[10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$ が得られており<sup>7)</sup>、本実験で得られた値は、Whethermax らの結果に近い値となっている。

アクリル材の線膨張係数はメーカー仕様値、アガチス材の線膨張係数は本実験で得られた値を、FEM の材料定数に代入して構造-熱の連成解析を行う。

#### 5.4.2 等方性材料の熱応力分布

図 5-8 に点 O が  $60^{\circ}\text{C}$  に達した時のサーモグラフィにより測定した温度分布、図 5-9～図 5-11 に DIC により求めた各ひずみ成分分布を示す。図 5-8 を見ると加熱部である左側 ( $x \leq 1.5L$ ) は高温となり、加熱していない右側に移動するにつれ温度が低下していく。

図 5-9 の  $\varepsilon_x$  の分布を見ると、高温部である継手試験片左側が過熱により大きくひずみ、低温部である継手試験片右側に移動するにつれ、ひずみ量が小さくなるのがわかる。

図 5-10 の  $\varepsilon_y$  の分布を見ると、 $\varepsilon_x$  と同様、高温部である継手試験片左側で大きくひずみ、低温部である継手試験片右側でひずみ量が小さくなっている。また、ひずみの大きさも  $\varepsilon_x$  とほぼ同程度である。これは、アクリル材の線膨張係数が等方性を有しているためである。

図 5-11 の  $\gamma_{xy}$  の分布を見ると、せん断ひずみは垂直ひずみに比べ小さいことがわかる。

以上より、熱負荷により、継手内には  $x$ 、 $y$  方向の垂直ひずみが主に生じることがわかる。

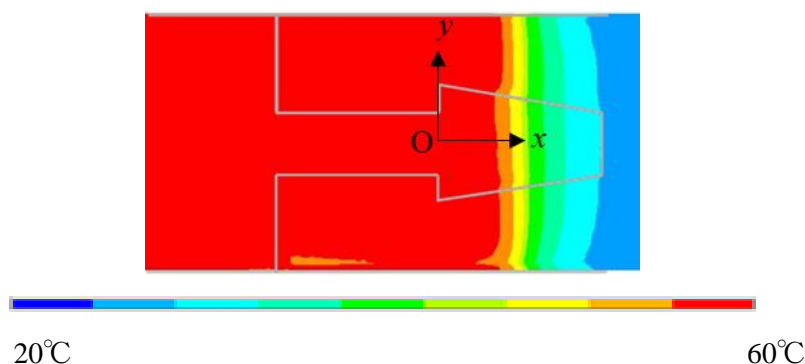


図 5-8 熱負荷を与えたときのサーモグラフィにより測定した継手内温度分布  
(アクリル試験片)

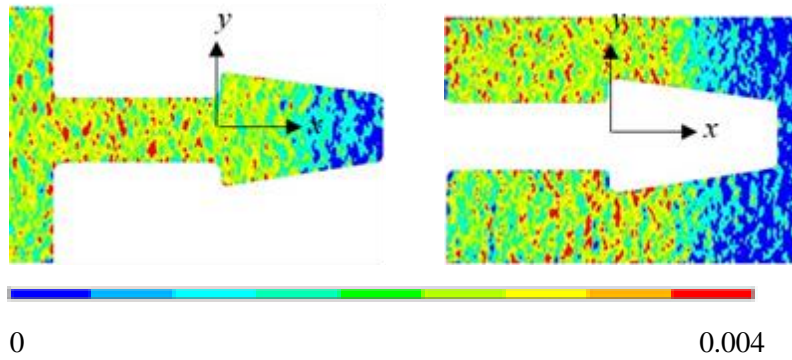


図 5-9 熱負荷を与えたときの鎌継手内の  $x$  軸方向のひずみ分布(DIC)  
(アクリル試験片)

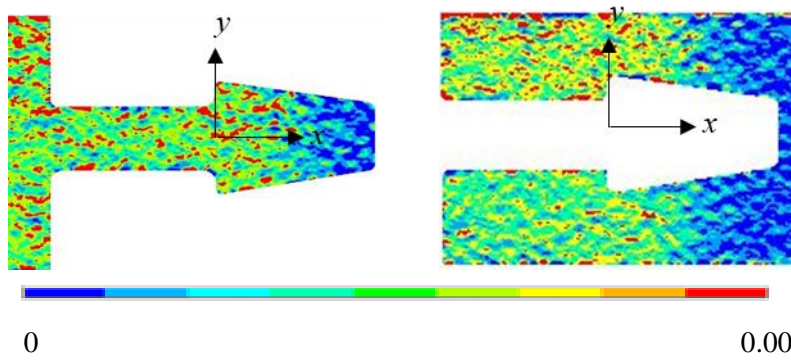


図 5-10 熱負荷を与えたときの鎌継手内の  $y$  軸方向のひずみ分布(DIC)  
(アクリル試験片)

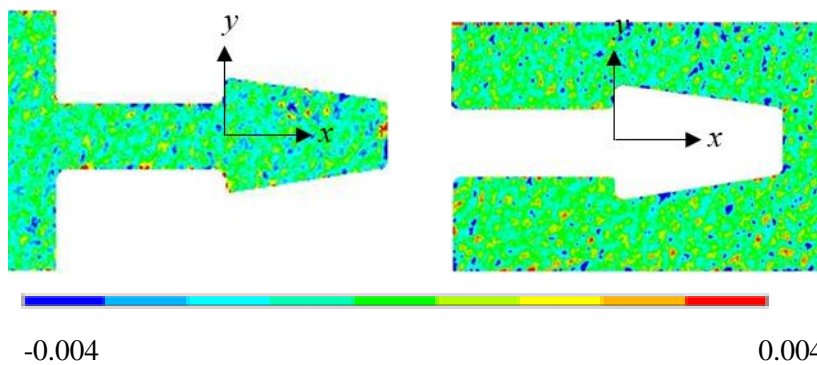


図 5-11 熱負荷を与えたときの鎌継手内のせん断ひずみ分布(DIC)  
(アクリル試験片)

FEM 連成解析を行い、O 点が 60°C に達した時の温度分布を図 5-12 に、各ひずみ成分分布を図 5-13～図 5-15 に示す。

図 5-12 を見ると加熱部である左側 ( $x \leq 1.5L$ ) は高温となり、加熱していない右側に移動するにつれ温度が低下していく。また、鎌頭部の温度が熱付加試験に比べて高くなっている。これは、熱負荷試験では、継手試験片表面からの熱流出により温度が低下するが、FEM は 2 次元解析であり、継手表面からの熱流出が考慮されないため温度が実験に比べて高温となっていると考える。

図 5-13 の  $\epsilon_x$  の分布を見ると、男木、女木ともに高温部である継手試験片左側が過熱により大きくひずみ、低温部である継手試験片右側に移動するにつれ、ひずみ量が小さくなることわかる。DIC に比べて温度が高い男木鎌頭部は、DIC の結果に比べてひずみ量が大きくなっている。また、男木鎌あご部の熱ひずみが周辺に比べて小さくなっている。

図 5-14 の  $\epsilon_y$  の分布を見ると、 $\epsilon_x$  と同様、高温部である継手試験片左側で大きくひずみ、低温部である継手試験片右側でひずみ量が小さくなっている。また、ひずみの大きさも  $\epsilon_x$  ほぼ同程度である。

図 5-15 の  $\gamma_{xy}$  の分布を見ると、ほぼせん断ひずみが生じていないことがわかる。

FEM の結果は、モデル境界条件の違いにより、熱負荷試験の結果と異なる部分があるが、ひずみ分布の傾向、ひずみ量は概ね一致しており、FEM により継手の熱応力解析が十分可能であることがわかる。

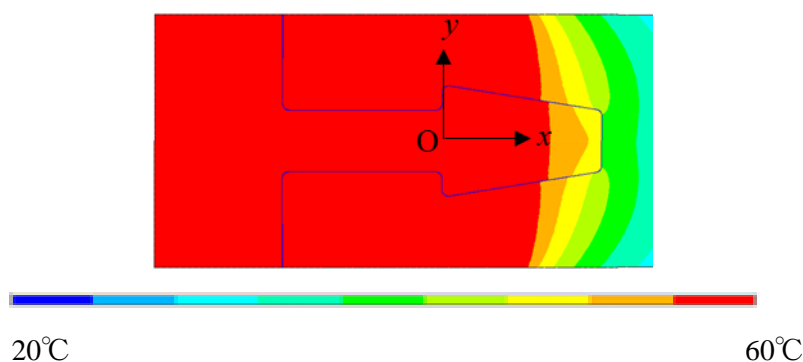


図 5-12 熱負荷を与えたときの鎌継手内の温度分布 (FEM)  
(アクリル試験片)



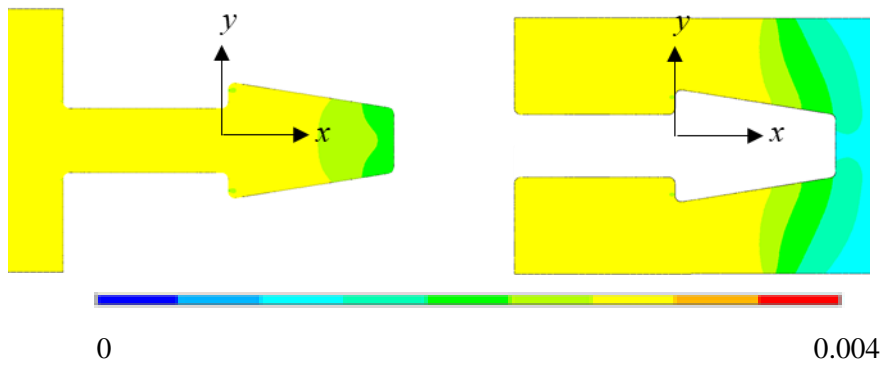


図 5-13 熱負荷を与えたときの鎌継手内の  $x$  軸方向のひずみ分布(FEM)  
(アクリル試験片)

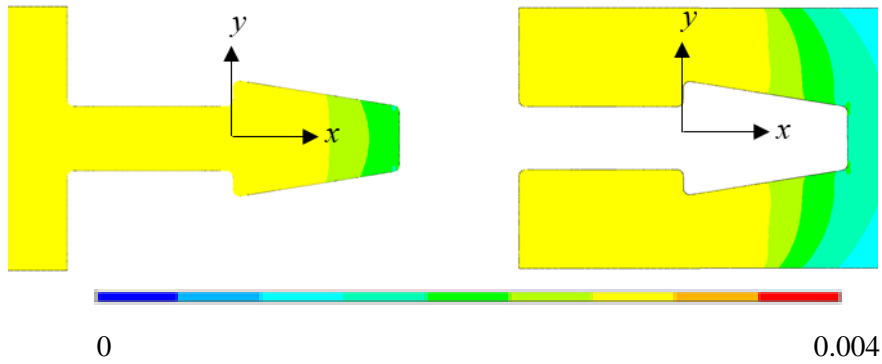


図 5-14 熱負荷を与えたときの鎌継手内の  $y$  軸方向のひずみ分布(FEM)  
(アクリル試験片)

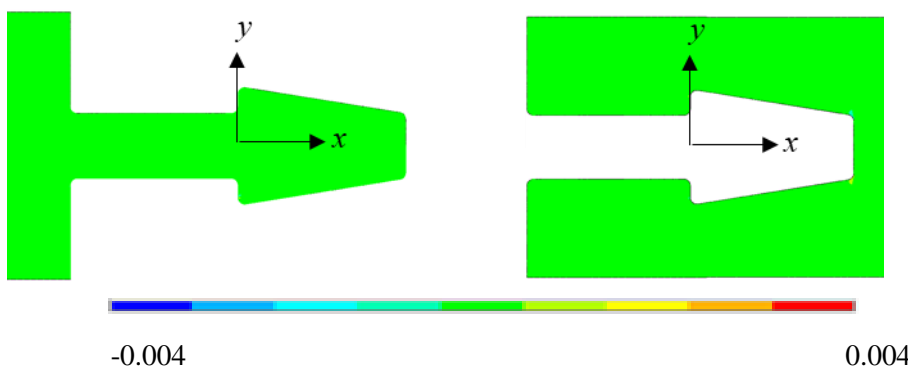


図 5-15 熱負荷を与えたときの鎌継手内のせん断ひずみ分布(FEM)  
(アクリル試験片)

FEM 連成解析を行い、O 点が 60°C に達した時の各応力成分分布を図 5-16～5-19 に示す。

図 5-16 の  $\sigma_x$  の分布を見ると、男木については、鎌あご部先端で圧縮応力が生じている。これは、男木は女木に囲まれているため、膨張により女木と接触圧力が生じたためと考えられる。また、鎌頭部では、y 軸方向について中心部が圧縮応力、周辺部が引張応力となっている。これは、中心部が高温、周辺部が低温となる温度勾配が生じていることにより熱応力が発生したと考えられる。一方、女木については、鎌あご部先端で圧縮応力が生じているが、これは男木との接触圧力によるものであると考えられる。また、鎌頭部に対して上下の領域において、内部で圧縮応力、試験片外縁及び男木との境界領域で引張応力が生じている。これは、男木と同様、領域内で温度勾配により熱応力が生じていると考えられる。

図 5-17 の  $\sigma_y$  の分布を見ると、男木については鎌頭部上部で圧縮応力が生じている。これは、図 5-12 の温度分布において、男木の鎌頭部上部の温度が周囲の女木部に比べて高く、男木部の熱膨張が女木に比べて大きいため、圧縮応力が生じていると考えられる。一方、女木は、男木の熱膨張により引張応力が生じている。

図 5-18 の  $\tau_{xy}$  の分布を見ると、女木部にわずかのせん断応力が生じているが、ほぼせん断応力が生じていないことがわかる。

図 5-19 の  $\sigma_1$  の分布を見ると、男木は鎌あご部根本、鎌頭部周囲に応力が生じている。女木については、鎌頭部上部に応力が生じている。熱負荷により引張及び曲げを加えたときの応力集中箇所と同じ場所に応力が生じており、熱負荷が継手の引張強度に影響を及ぼすことがわかる。

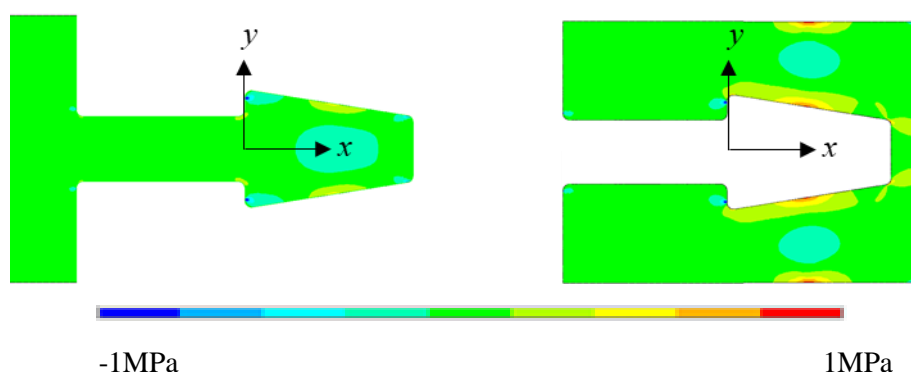


図 5-16 熱負荷を与えたときの鎌継手内の x 軸方向垂直応力(FEM)  
(アクリル試験片)

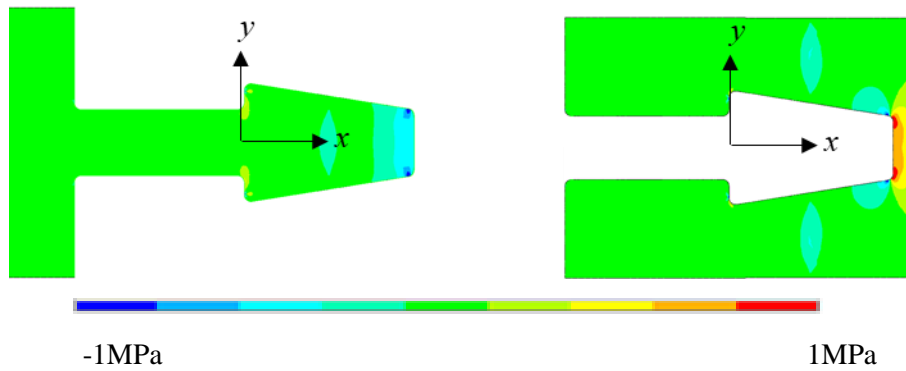


図 5-17 熱負荷を与えたときの鎌継手内の  $y$  軸方向垂直応力(FEM)  
(アクリル試験片)

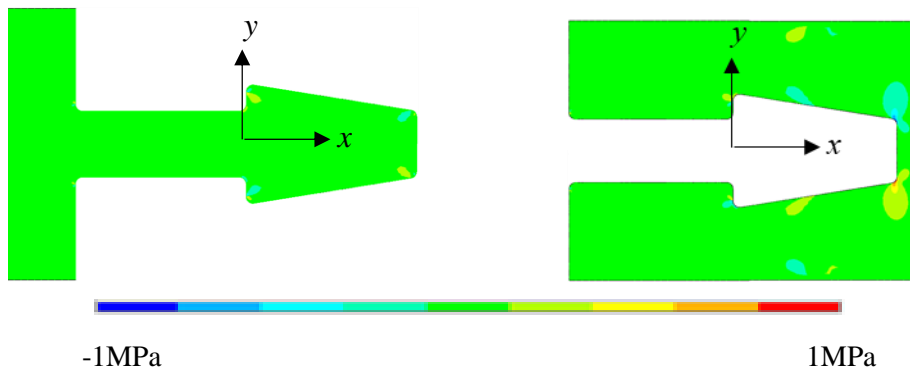


図 5-18 熱負荷を与えたときの鎌継手内のせん断応力分布(FEM)  
(アクリル試験片)

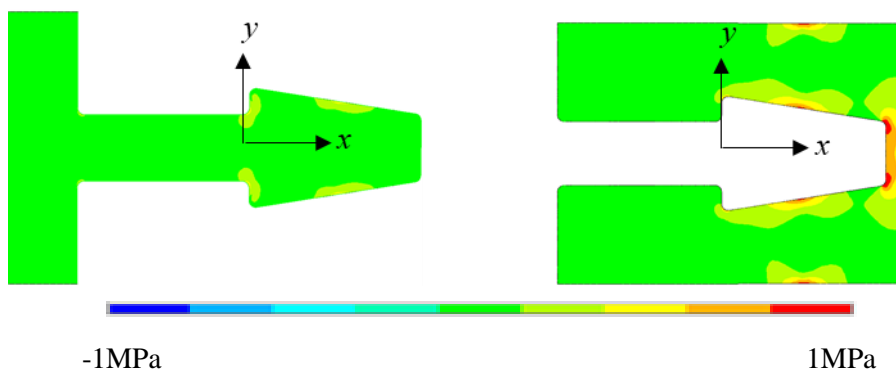


図 5-19 熱負荷を与えたときの鎌継手内の主応力分布(FEM)  
(アクリル試験片)

### 5.4.3 直交異方性材料

図 5-20 に O 点が  $60^{\circ}\text{C}$  に達した時のサーモグラフィにより測定した温度分布を，DIC により求めた各ひずみ成分分布を図 5-21～図 5-23 に示す．

図 5-20 を見ると加熱部である左側 ( $x \leq 1.5L$ ) は高温となり，加熱していない右側に移動するにつれ温度が低下していく．

図 5-21 の  $\epsilon_x$  の分布を見ると，男木部，女木部ともに熱ひずみがほとんど確認できない．これは，アガチス材の  $x$  軸方向の線膨張係数が  $y$  軸方向に比べて  $1/10$  程度と小さいためである．

図 5-22 の  $\epsilon_y$  の分布を見ると，男木部，女木部ともに高温部である継手試験片左側で大きくひずみ，低温部である継手試験片右側でひずみ量が小さくなっている．また，ひずみの大きさは  $\epsilon_x$  より大きい．これは， $y$  方向の線膨張係数が  $x$  軸方向に比べて大きいためである．また  $x$  軸に並行に線状のひずみが分布している．これはアガチス試験片内の早材，晩材で線膨張係数がことなるためこのような分布が生じていると考えられる．

図 5-23 の  $\gamma_{xy}$  の分布を見ると，ほぼせん断ひずみが生じていないことがわかる．

このことから，熱負荷により継手内には垂直の熱ひずみが生じるが，せん断ひずみは生じないことがわかる．

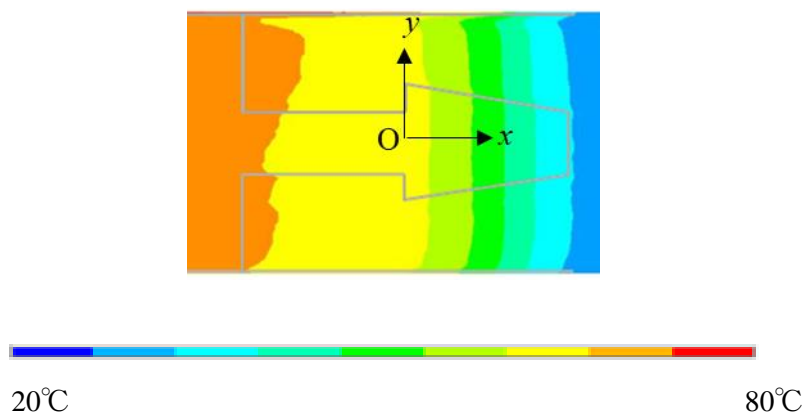


図 5-20 熱負荷を与えたときの鎌継手内の温度分布 (サーモグラフィ)  
(アガチス試験片)

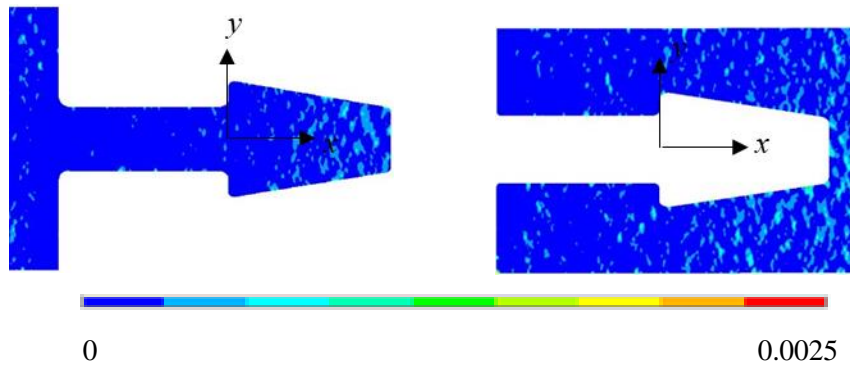


図 5-21 熱負荷を与えたときの鎌継手内の温度分布 (DIC)  
(アガチス試験片)

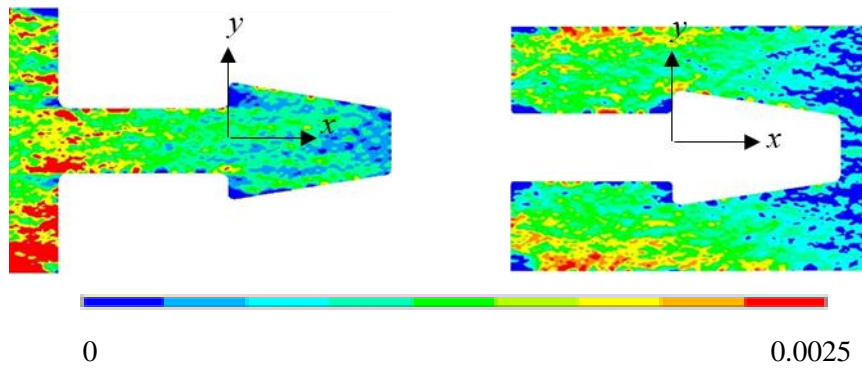


図 5-22 熱負荷を与えたときの鎌継手内の  $y$  軸方向のひずみ分布(DIC)  
(アガチス試験片)

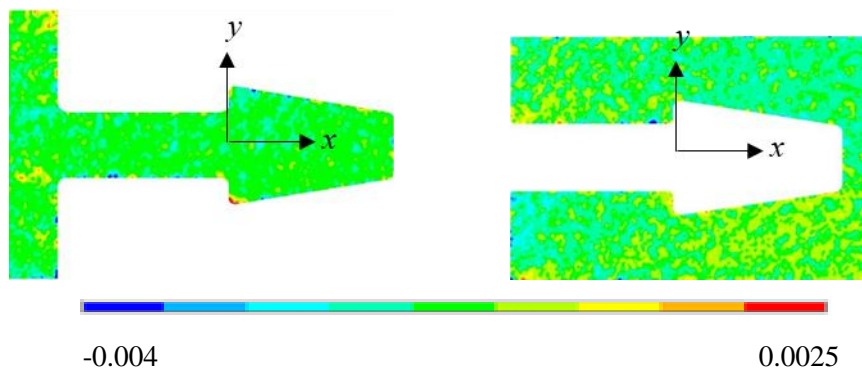


図 5-23 熱負荷を与えたときの鎌継手内のせん断ひずみ分布(DIC)  
(アガチス試験片)

FEM 連成解析において、O 点が 60°C に達した時の温度分布を図 5-24 に、各ひずみ成分の分布を図 5-25～図 5-27 に示す。

図 5-24 をみると加熱部である左側 ( $x \leq 1.5L$ ) は高温となり、加熱していない右側に移動するにつれ温度が低下していく。また、鎌頭部の温度が熱付加試験に比べて高くなっている。これは、熱負荷試験では、継手試験片表面からの熱流出により温度が低下するが、FEM は 2 次元解析であり、継手表面からの熱流出が考慮されないため温度が実験に比べて高温となっていると考える。

図 5-25 の  $\varepsilon_x$  の分布を見ると、図 5-21 に示す DIC の結果と同様、y 軸方向のひずみ  $\varepsilon_y$  比べてほとんど熱ひずみが生じていない。

図 5-26 の  $\varepsilon_y$  の分布を見ると、高温部である継手試験片左側で大きくひずみ、低温部である継手試験片右側にひずみ量が小さくなっており、DIC の結果と分布の傾向が一致している。

図 5-27 の  $\gamma_{xy}$  の分布を見ると、DIC の結果と同様、ほぼせん断ひずみが生じていないことがわかる。

FEM の結果は、モデル境界条件の違いにより、熱負荷試験の結果と異なる部分があるが、ひずみ分布の傾向、ひずみ量は概ね一致しており、直交異方性材料の継手についても、FEM により継手の熱応力解析が十分可能であることがわかる。

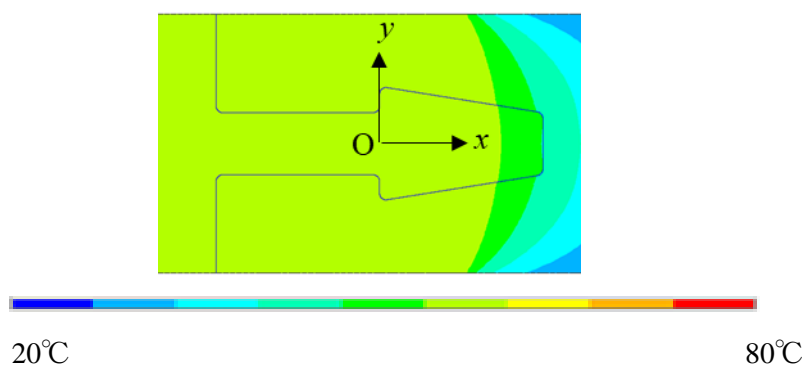


図 5-24 熱負荷を与えたときの鎌継手内の温度分布 (FEM)  
(アガチス試験片)

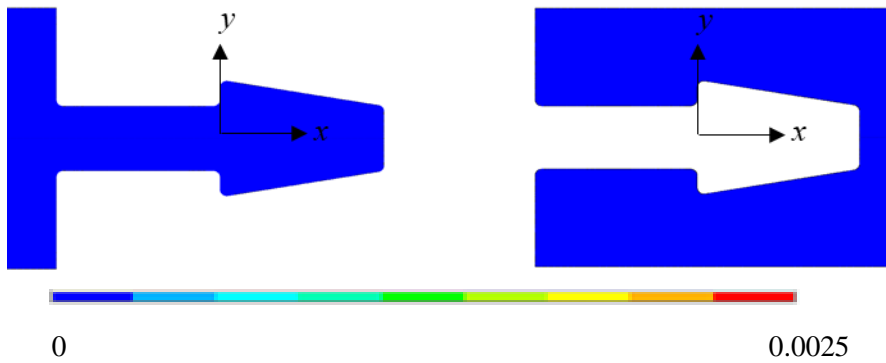


図 5-25 熱負荷を与えたときの鎌継手内の  $x$  軸方向のひずみ分布(FEM)  
(アガチス試験片)

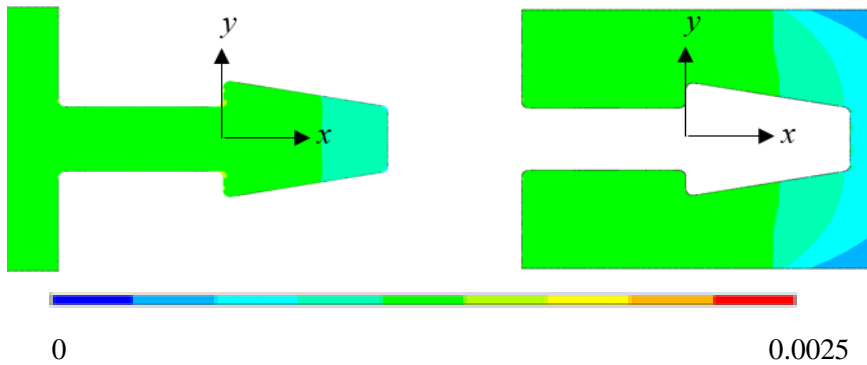


図 5-26 熱負荷を与えたときの鎌継手内の  $y$  軸方向のひずみ分布(FEM)  
(アガチス試験片)

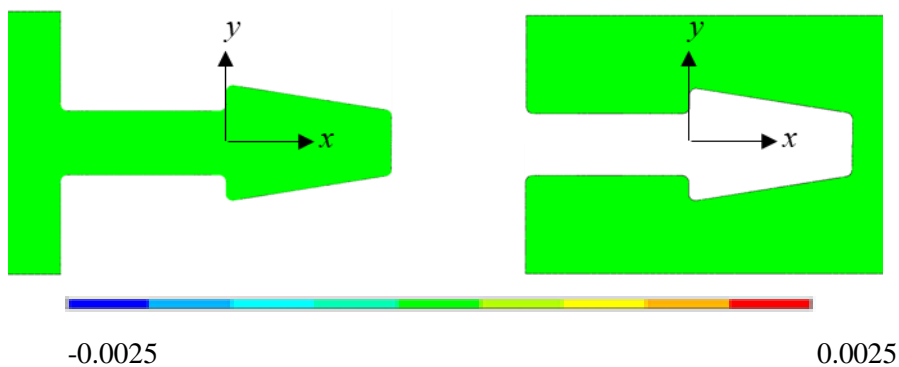


図 5-27 熱負荷を与えたときの鎌継手内のせん断ひずみ分布(FEM)  
(アガチス試験片)

FEM 連成解析において、O 点が 60°C に達した時の各応力成分分布を図 5-28～5-31 に示す。

図 5-28 の  $\sigma_x$  の分布を見ると、男木については、鎌あご部先端でわずかに圧縮応力が生じている。これは、男木は女木に囲まれているため、膨張により女木と接触圧力が生じたためと考えられる。また、鎌頭部では、y 軸方向について中心部が圧縮応力、周辺部が引張応力となっている。これは、中心部が高温、周辺部が低温となる温度勾配が生じていることにより熱応力が発生したと考えられる。一方、女木については、鎌あご部先端で圧縮応力が生じているが、これは男木との接触圧力によるものであると考えられる。また、鎌頭部に対して上下の領域において、内部で圧縮応力、試験片外縁及び男木との境界領域で引張応力が生じている。これは、男木と同様、領域内で温度勾配により熱応力が生じていると考えられる。図 5-25 の  $\epsilon_x$  の分布では、ほとんど熱ひずみが生じていないが、 $\sigma_x$  は生じることがわかる。

図 5-29 の  $\sigma_y$  の分布を見ると、男木部、女木部ともに、熱応力はほとんど生じていない。

図 5-30 の  $\tau_{xy}$  の分布を見ると、男木部、女木部とともに、熱応力は生じていない。

図 5-31 の  $\sigma_1$  の分布を見ると、男木は鎌あご部根本、鎌頭部周囲に応力が生じている。女木については、鎌頭部上部に応力が生じている。 $\sigma_1$  の分布は図 5-28 の  $\sigma_x$  の応力分布とほぼ一致しているが、これは、 $\sigma_x$  の占める割合が大きいためであると考えられる。

男木、女木ともに、熱負荷により引張及び曲げを加えたときの応力集中箇所と同じ場所に応力が生じている。このことから、熱負荷が継手の引張強度に影響を及ぼすことがわかる。

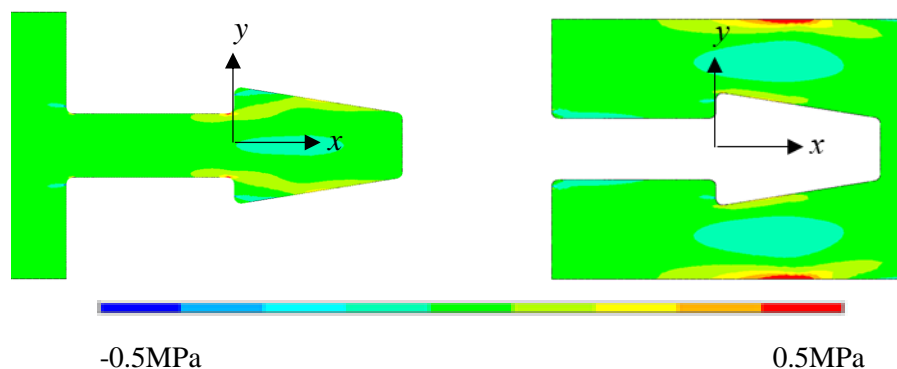


図 5-28 熱負荷を与えたときの鎌継手内の x 軸方向垂直応力(FEM)  
(アガチス試験片)



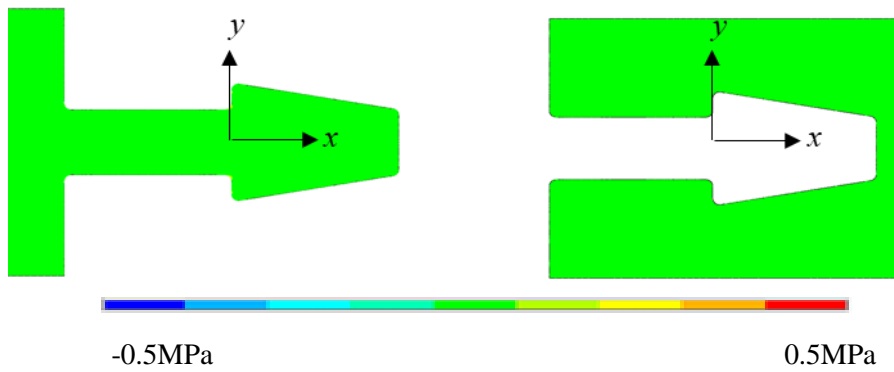


図 5-29 熱負荷を与えたときの鎌継手内の  $y$  軸方向垂直応力(FEM)  
(アガチス試験片)

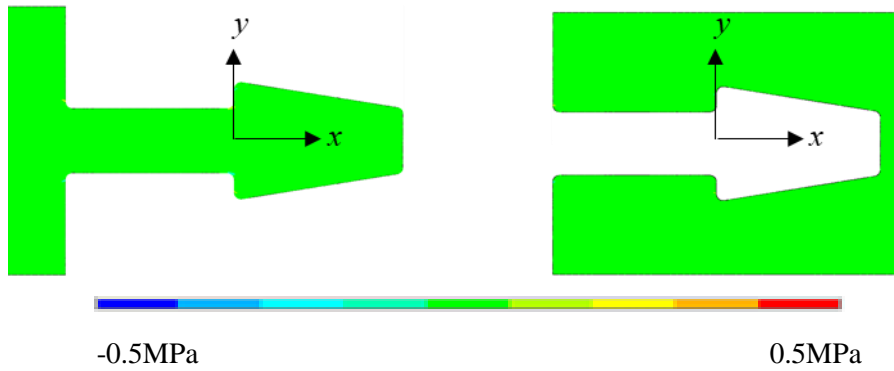


図 5-30 熱負荷を与えたときの鎌継手内のせん断応力分布(FEM)  
(アガチス試験片)

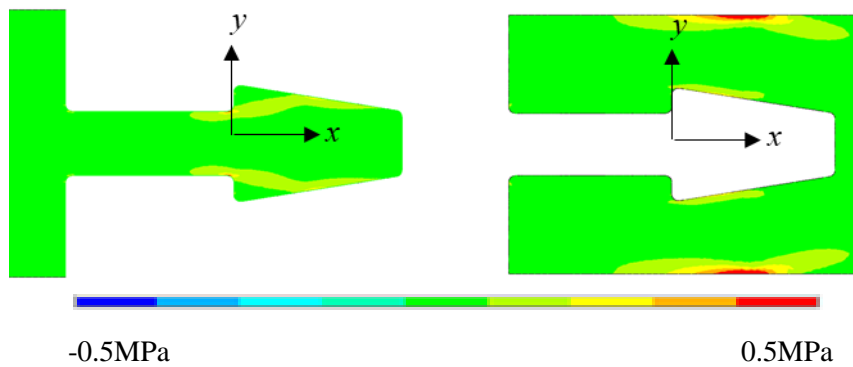


図 5-31 熱負荷を与えたときの鎌継手内の主応力分布(FEM)  
(アガチス試験片)

## 5.5 まとめ

本章では、継手部に熱負荷が作用したときに継手部に生じる熱ひずみ及び熱応力を解析し、熱応力が引張強度に与える影響を明らかにした。

継手試験片の材質は、等方性材料としてアクリル材、直交異方性材料としてアガチス材を選定した。

DICによる熱ひずみ解析実験では、アルミフィルムヒーターによる加熱により熱負荷が与えられた鎌継手試験片について、DICによる熱ひずみ分布およびサーモグラフィによる温度分布を観察し、これらの結果から熱ひずみを測定した。

熱ひずみ解析の結果より、アクリル及びアガチス材の試験片の線膨張係数を測定した。得られた線膨張係数の値は、アクリル材の線膨張係数については、メーカー仕様の値とよく一致し、アガチス材については、Whethermax らは数種の樹種の線膨張係数の値と近いことから、DICにより正確に熱ひずみを求めることができることを確認した。

継手内の熱ひずみは、高音部に大きな熱ひずみが生じており、温度分布に応じた熱ひずみ分布となっている。アクリル材は、等方性材料のため、 $x$ 、 $y$ 方向について同程度の熱ひずみが生じ、アガチス材は、 $y$ 方向については、温度分布に応じた熱ひずみが生じていたが、 $x$ 軸方向の線膨張係数が小さいためほとんど熱ひずみが観測されなかった。

次に、FEMにおいて、解析モデルを熱ひずみ解析試験に適合するよう設定し、DIC解構造-伝熱の連成解析を行った。両者のひずみ解析結果を比較検討した結果、温度分布、熱ひずみ分布の傾向はよく一致しており、FEMにより継手の熱応力解析が十分可能であることがわった。そのうえで、FEMにより熱応力分布を求めた。

応力分布については、アクリル材、アガチス材共に温度勾配が生じる箇所で熱応力が生じていた。また、アガチス材については、 $x$ 軸方向の熱ひずみはほとんど生じないが、 $\sigma_x$ が他の応力成分に比べて大きな熱応力が生じていることを確認した。

アクリル材、アガチス材共に、引張及び曲げを受けるときの応力集中箇所である鎌あご部に熱応力が生じていることから、加熱による熱負荷は、継手の引張及び曲げ強度に影響を及ぼすことが明らかになった。

## 参考文献

- (1) 中戸莞二編, 新編木材工学 (1985), p.112, 養賢堂.
- (2) 三菱ケミカル(株)ホームページ, アクリルライト<sup>TM</sup>L 物性表, <https://www.m-chemical.co.jp/acrylite/> (2021年1月3日参照)
- (3) 高橋徹, 中山義男編, 木材科学講座3 物理 (第2版), 海青社 (1992), p.47
- (4) 森林総合研究所監修, 改訂4版 木材工業ハンドブック(2004), p.118, 丸善出版.
- (5) 日本木材学会編, 木材の物理, 理工学社 (2007), p.205
- (6) 森林総合研究所監修, 改訂4版 木材工業ハンドブック(2004), p.129, 丸善出版.
- (7) Wheathermax, R. C. and Stamm, A. J., The coefficient of thermal expansion of wood and wood products, U. S. Forest Prod. Lab. Rpt. 1487(1946), pp.24

## 6章 結 言

### 6.1 結論

本研究では、代表的な継手形状である鎌継手の強度向上に資するため、引張、曲げ荷重及び熱負荷を受けるときの応力解析を行い、応力分布や応力集中を明らかにした。

一軸引張荷重及び曲げ荷重を受けるときの応力分布や応力集中について DIC による測定実験及び FEM による応力解析をおこなった。その結果を元に、男木、女木各々に対する応力集中係数を算出する計算式を提案した。さらに、提案した式を用いて、継ぎ手を一体の部材とするときの、引張荷重に対する最適な形状を求めた。

熱負荷を受ける鎌継手については、熱応力分布を DIC による測定実験、FEM による解析により、熱負荷により発生する熱応力が継手強度に与える影響を明らかにした。

第 1 章では、本研究の背景及び伝統的な継手形状の説明、継手強度に関する既往の研究を紹介した。その上で本研究の目的について論じた。

第 2 章では、継手の応力集中係数の算定に必要な応力集中係数の理論及び簡易な計算式の提案を行った。円孔、楕円孔、双曲線切り欠きを有する平板の応力集中係数については、厳密解が求められているが、本研究の対象とする継手形状を含む多くの形状については厳密解を求めることは困難である。

ノイバーは、厳密解ではないが、任意の切り欠き深さを有する帯板の応力集中係数について、楕円孔、双曲線切り欠きの応力集中係数計算式を合成して求めるノイバーの三角則を提案している。ノイバーの三角則は、簡便な式のためこれまで広く用いられてきているが、最大 10% 程度の誤差があり、より正確な式が求められている。

野田らは、任意の切り欠き深さを有する帯板について体積法を用いて、より正確な応力集中係数を求め、ノイバーの三角則を補正する式を求めている。野田らの式は、1% 以内の誤差で精度よく応力集中係数を求めることができるが、式が複雑であるとともに、適用範囲により複数の式を使い分ける必要があるなどの課題がある。

本章では、ノイバーの三角則を基に、FEM などの結果を基に、任意の切り欠き形状をもつ帯板の応力集中係数を求めることができる簡易な計算式を提案した。提案式について、野田らの式に一致するよう非線形最小二乗法でカーブフィッティングした結果、野田らの式に対して 1% 程度の誤差で一致し、精度よく応力集中係数を求めることができた。また、提案した式の係数は 3 個であり、野田らの補正式の係数 21 個に対して大幅に少なくなっており、簡易な計算式となった。

第 3 章では、代表的な継手形状である鎌継手が一軸引張荷重を受ける場合における応力解析を実測および数値解析を用いて行い、継手部の応力集中について検討した。継手材質は、等方材料としてアクリル、直交異方性材料としてアガチス材を選定している。はじめに、引張荷重を加えたときの鎌継手のひずみ分布を画像相関法 (DIC) で測定し、

鎌継手の継手応力集中部を調べた。アクリル材、アガチス材ともに男木部は鎌あご部根元、女木部は鎌あご部先端に応力集中が生じていることがわかった。また、直交異方性材料であるアガチス材の応力集中係数は、等方性材料であるアクリル材に対して2倍程度であった。これは、異方性材料で引張方向の縦弾性係数が横方向の縦弾性係数より大きい場合、応力集中係数が大きくなるためである。次に、DICの観測結果に整合するようにモデル条件を設定しFEMを行った。FEMの結果は、DICの結果によく一致し、両解析の解析結果は妥当性を持つことを確認できた。さらに、鎌継手の寸法パラメータを変えて解析を行い、鎌継手寸法と継手応力集中係数の関係を明らかにした。その結果を元に、等方性材料、直交異方性材料それぞれに対する男木部、女木部各々に対する継手応力集中係数を算出する計算式を提案した。提案した式は、FEMとの平均誤差は等方性材料は2%以下、直交異方性材料は3%以内の誤差であった。さらに、提案した計算式から、鎌継手が一軸引張荷重を受ける時の最適形状を求めた。求めた最適寸法形状に生じる最大主応力は、伝統的に決定された寸法形状の継手応力集中係数に比べて、50%小さくなった。継手応力集中係数減少の内訳は、鎌首幅を従来に比べて小さくすることで約10%、フィレット半径を大きくすることで約40%であった。

第4章では、鎌継手が曲げ荷重を受ける場合における応力解析をFEMで行い、継手部の応力集中について検討した。継手上半において、男木は鎌あご部の付け根、女木は鎌あご部先端に応力集中が生じており、応力分布は引張力が作用した場合の応力分布に近い。これは、継手上半分は、曲げにより引張応力が生じるためと考えられる。一方、継手下半分はほとんど応力集中が生じていない。これは、継手下半分は、曲げにより圧縮応力が生じるが、男木、女木の継手接触部が圧縮応力により密着するため、継手がない部材と同様、圧縮応力が一様に作用するためと考えられる。次に、寸法パラメータを変えて応力解析を行い、曲げ荷重について男木部、女木部各々に対する継手応力集中係数を算出する計算式を提案した。提案した式は、FEMとの平均誤差が3~5%程度の誤差であった。

提案した計算式を用いて、曲げ荷重を受ける鎌継手に生じる応力集中係数を最小にする最適形状を求めた。曲げ荷重に対する最適形状は、ほぼ引張に対する最適形状と同形状であった。これは、引張及び曲げ荷重が作用すると、継手部には共に引張応力が生じ、同様の応力集中が生じるためであると考えられる。このことから、引張に対する最適形状は、曲げ荷重に対する継手応力集中係数も同様に減少させ、従来形状に比べて引張及び曲げの両方に強い形状であることを確認した。求めた最適寸法形状に生じる最大主応力は、伝統的に決定された寸法形状の継手応力集中係数に比べて、50%小さくなった。継手応力集中係数減少の内訳は、鎌首幅を従来に比べて小さくすることで約10%、フィレット半径を大きくすることで約40%であった。

第5章では、継手部に熱負荷が作用したときに継手部に生じる熱ひずみ及び熱応力を解析し、熱応力が引張強度に与える影響を明らかにした。

DICによる熱ひずみ解析実験では、アルミフィルムヒーターによる加熱により熱負荷が与えられた鎌継手試験片について、DICによる熱ひずみ分布およびサーモグラフィによる温度分布を観察し、これらの結果から熱ひずみを測定した。

熱ひずみ解析の結果より、アクリル及びアガチス材の試験片の線膨張係数を測定した。得られた線膨張係数の値は、アクリル材の線膨張係数については、メーカー仕様の値とよく一致し、アガチス材については、Whethermax らは数種の樹種の線膨張係数の値と近いことから、DICにより正確に熱ひずみを求めることができることを確認した。

継手内の熱ひずみは、高音部に大きな熱ひずみが生じており、温度分布に応じた熱ひずみ分布となっている。アクリル材は、等方性材料のため、 $x$ ,  $y$  方向について同程度の熱ひずみが生じ、アガチス材は、 $y$  方向については、温度分布に応じた熱ひずみが生じていたが、 $x$  軸方向の線膨張係数が小さいためほとんど熱ひずみが観測されなかった。

次に、FEMにおいて、解析モデルを熱ひずみ解析試験に適合するよう設定し、構造-伝熱の連成解析を行った。両者のひずみ解析結果を比較検討した結果、温度分布、熱ひずみ分布の傾向はよく一致しており、FEMにより継手の熱応力解析が十分可能であることがわった。そのうえで、FEMにより熱応力分布を求めた。

応力分布については、アクリル材、アガチス材共に温度勾配が生じる箇所で熱応力が生じていた。また、アガチス材については、 $x$  軸方向の熱ひずみはほとんど生じないが、 $\sigma_x$  が他の応力成分に比べて大きな熱応力が生じていることを確認した。

アクリル材、アガチス材共に、引張及び曲げを受けるときの応力集中箇所である鎌あご部に熱応力が生じていることから、加熱による熱負荷は、継手の引張及び曲げ強度に影響を及ぼすことが明らかになった。

## 6.2 今後の課題

3章,4章では、弾性域における引張、曲げ荷重に対する強度評価について、応力解析及び応力集中を明らかにしたうえで、継手寸法に対する継手応力集中係数計算式の提案及び継手応力集中係数を最小とする寸法を提案した。

本論文では、木材の試験片として年輪が明瞭でないなど比較的材質が均等であるアガチス材を用いた。日本の木材は、年輪が明確であるスギやヒノキが主流である。年輪が明確な木材は早材、晩材で材料特性が異なる。このため、スギ材、ヒノキ材の継手の強度の評価にあたっては、晩材、早材及び両者の境界部の応力分布や応力集中を明らかにする必要がある。また、「3.2.2 継手の材質」で述べたとおり、建築材料に求められる項目として、弾性域での強度とともに「耐震性」が求められる。建築材料とともに、建築部材を接合する継手についても耐震性が求められる。耐震性を評価するためには、降伏や亀裂発生後の破壊形態を明らかにする必要がある。したがって、今後、継手の引張、曲げ荷重を受ける破壊試験を行い継手寸法と破壊形態について明らかにし、必要な耐震

性を確保した上での、引張、曲げに対して強度が高い形状を提案する。

5章では、鎌継手が熱負荷を受けるときの熱ひずみ及び熱応力分布を明らかにした。本論文では、木材に熱負荷が単独で負荷される条件で行ったが、熱負荷が鎌継手の引張、曲げ強度への影響をさらに詳細に明らかにするためには、引張または曲げ荷重と熱負荷が同時に作用する条件で解析を行う必要がある。

木材は、温度とともに木材中の水分割合である含水率により材料特性や膨張、収縮する。一般的に、含水率が高いほど軟化するとともに膨張する。このことから、含水率を考慮した解析も行っていく必要がある。

## 本研究に関する著者の発表論文と口頭発表

### 1. 学術雑誌等

- (1) 中村匠, 荒井優子, 小島朋久, 辻知章, “一軸引張荷重を受ける鎌継手の応力解析と応力集中係数計算式”, 機械学会論文集 86(886), 19-00388 (2020)
- (2) 中村匠, 山上雄太朗, 小島朋久, 辻知章, “木材の直交異方性を考慮した引張及び曲げを受ける鎌継手の応力集中係数計算式と形状最適化, 日本木材学会誌(2020)

### 2. 国際会議における発表

- (1) T. Nakamura, Y. Arai and T. Tsuji, “Formulation of Stress Concentration Factor and Shape Optimization of Gooseneck Joint by Using FEM Analysis” , October26-29 2018, ACMFMS, Tainan, Taiwan.
- (2) T. Nakamura, Y. Arai, Y.Yamakami and T. Tsuji, “FORMULATION OF JOINT STRESS CONCENTRATION FACTOR AND THEMAL STRSEES OF GOOSENECK JOINT BY USING FEM ANALYSIS” ,TS2019, June 1-5 2019, Hangzhou, China

### 3. 国内会議, シンポジウム等での発表

- (1) 中村匠, 荒井優子, 辻知章, ” FEM 解析による鎌継手の応力集中係数計算式”, 日本材料学会材料シンポジウムワークショップ(2017)
- (2) 中村 匠, 荒井 優子, 山上 雄太朗, 辻 知章, “一軸引張を受ける鎌継手の継手応力集中解析” , 2019 年日本機械学会年次大会(2019), pp.S03104
- (3) 荒井優子, 中村匠, 辻知章, “引張りを受ける鎌継手の応力集中係数“, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス, pp. OS1724



## 謝 辞

本研究を行うにあたり、多くの方からご支援をいただきました。

本論文の主査である中央大学理工学部教授辻知章先生には、学部生、博士前期課程時代から、変わらず懇切丁寧なご指導いただきました。博士課程への入学に際しては、親身に相談に乗っていただき、博士課程入学前の2年間は研究員として研究テーマの選定や研究の進め方をご助言いただき、社会人として働きながら博士課程に入学することができました。博士課程では、研究への助言や研究者としての心構えをご教示いただいたことで、研究を進めることができました。大変感謝しております。本論文の副査として審査していただいた中央大学理工学部教授米津明生先生、同教授鈴木宏明先生、同教授佐藤尚次先生には、大変貴重な指摘をいただきありがとうございました。本論文の学外の副査として審査していただいた鳥取大学大学院工学研究科教授小畑良洋先生には、学部、博士前期課程時代から助言や相談に乗っていただき、今回の審査でも木材の研究を今後進め方についてアドバイスをいただくなど大変お世話になりました。ありがとうございました。中央大学理工学部助教小島朋久先生には、普段から研究へのアドバイスや投稿論文の添削など、熱心にご指導いただきありがとうございました。

また、研究を進めるにあたり、実験データの採取及び整理を行っていただいた荒井優子さん、山上雄太朗さん、小澤萌さんには大変お世話になりました。社会人で時間の制約のある私の研究のサポートをしていただき、効率的に研究を進めることができました。感謝しております。辻研究室の皆様には、研究についての議論をするとともに、ときには雑談で息抜きするなど、研究を進める心の支えになりました。ありがとうございました。

最後に、博士課程入学に理解をいただきサポートをいただいた職場の皆様、家族に感謝し、謝辞とさせていただきます。

中村 匠