メタマテリアルを用いた過酷環境下における接着接合継手の信頼性の向上に関する研究

Study on improving reliability of adhesively bonded joints in sever environment using metamaterials

研究代表者　東京都立大学システムデザイン学部　助教　大島草太
Sota Oshima

A novel method to improve the reliability of adhesively bonded joints using mechanical metamaterials has been proposed. Mechanical metamaterials were employed to reduce peel stress at the end of joints. Equivalent elastic properties of several metamaterials were obtained by finite element (FE) analyses and the homogenization method to find desired metamaterials. The results of the FE analyses showed that elastic properties were able to control for metamaterials that have oblique members. By applying elastic properties of a metamaterial obtained by the FE analyses, the lap strength of joints slightly increased because of a reduction in peak stress and an increase in stress transfer efficiency. The proposed method, therefore, proved that metamaterials are good candidates to improve the reliability of adhesively bonded joints.

要旨

接着接手の信頼性を向上させるためにメタマテリアルを用いた新規の継手様式を提案した．接着継手端部におけるはく離抑制のために必要となるメタマテリアルの要件を損傷進展解析によって検討した．その結果，面外方向に柔軟でせん断方向にある程度の弾性率を有するメタマテリアルが最適であることが明らかになった．この要件を満たすメタマテリアルを設計するため，種々のメタマテリアルに対し均質化法解析を行い，弾性特性を決定した．均質化法解析の結果，ひし形のメタマテリアルが設計の自由度が高いことが明らかになった．最後に，設計したメタマテリアルを導入した接着接手の損傷進展解析を行った．その結果，メタマテリアルを導入することでピール応力の低減とせん断応力の再配分が生じ，特にラップ長が長い場合に継手強度の向上が可能であることを見出した．

1．　まえがき

接着継手は機械的接合と比較して軽量で応力集中が避けられるなど様々な利点を有するため，自動車，航空宇宙，エネルギー産業などでの利用が拡大している．例えば，図 1 に示す CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics，炭素繊維強化複合材料）製高圧水素タンクでは，金属製の口金と CFRP の本体を接合するために接着接合の使用が検討されている．しかし，接着継手の端部は応力特異場となるため，はく離が発生しやすく，信頼性の観点で課題が指摘されている．特に，CFRP と金属材料など，熱膨張率の異なる材料を接合する場合にははく離が発生しやすく，宇宙構造物や CFRP 製高圧水素タンクなどを設計するうえでの障害となっている．一般に，接着部の端部で応力集中を緩和させるためには被着体へ勾配加工を施すことや，フィレットの付与により応力集中を避ける方法が取られるが，難削材である CFRP やチタン合金などにこれらの加工を安定的に施すのは困難である．継手端部での応力集中を緩和するために，端部に柔軟な接着剤を配し，内部において剛な接着剤を使用する傾斜機能継手が提案されており[1]，継手強度の向上が見込めることが明らかになっている．しかし，接着剤そのものの剛性を変化させながら接合強度や剛性との両立を図るには限界がある．

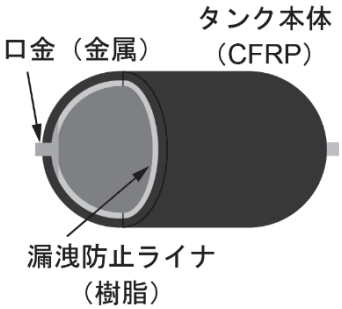

図 1 CFRP 製高圧水素タンク

一方，積層造形などの技術革新により，これまで困難とされてきた形状の構造を作製することが可能となりつつあり，数μm 程度の構造の積層造形も実現している[(2)~(4)]．積層造形によって製作可能となった材料の一つとしてメタマテリアルが挙げられる．メタマテリアルは例えば格子などの微視的構造を有しており，母材の材料特性に加えて，その幾何学的構造が材料の特性を決定するものをいう．メタマテリアルの機械的特性は構造によって「設計」することが可能であるため，使用する環境や条件に適合したメタマテリアルによって構造物の特性向上が期待できる．実際に，メタマテリアルではないが異種接合部の界面に微小構造（ナノスプリング）を形成することで界面での特異応力場が消失し，接合部の端部におけるはく離抑制が可能であるという報告もなされている[(5)~(6)]．そこで，本研究の目的をメタマテリアルを用いて接着界面での力学的特性を能動的に制御することで，接着継手端部における応力集中を緩和し，信頼性の向上を図ることとする．この目標を実現するために初期の検討としてメタマテリアルの適用性を数値解析により検討する．

2．メタマテリアルを用いた応力集中緩和

図 2 にメタマテリアルを適用した接着継手の概要を示す．本研究では金属被着体の表面にメタマテリアルを 3D プリンタなどを用いて直接積層造形することを想定する．したがって，接合部は金属被着体，メタマテリアル，接着剤，CFRP 被着体で構成されている．接着継手の使用環境を考慮すると，構造として必要な荷重を伝達できること，端部での大きな変位に耐えうること，端部で大きな変位が発生した際に接着層が破壊する荷重に達しないことの三つの要件が求められる．本研究ではこの要件に合致したメタマテリアルを設計し，その適用性を明らかにする．

3．予備的検討

接着継手の特性向上に適したメタマテリアルを決定するにあたり，予備的検討を行った．予備的検討では図 2 のメタマテリアル部分を連続体要素でモデル化した単純重ね継手に対し，メタマテリアル部の弾性率を変化させた損傷進展解析を行い，メタマテリアル部の弾性特性が継手の強度に与える影響を調べた．

3．1　解析方法

解析には汎用有限要素解析ソフトウェア（Abaqus/Explicit）を用いた．CFRP 部とメタマテリアル部は直交異方弾性体を，チタン合金を想定した金属部は等方弾性体を仮定し，4 節点の平面応力要素を用いてモデル化した．CFRP と被着体の弾性特性を表 1 と表 2 にそれぞれ示す．接着剤は結合力要素でモデル化した．結合力要素はある応力までは弾性的なふるまいをし，応力の臨界値に達した後は所定のエネルギーを散逸しながら分離する要素であり，接着部や複合材のはく離進展解析によく用いられる．接着剤樹脂を想定した結合力要素の特性を表 3 に示す．CFRP は直交積層板を想定し，$[0_2/90_2/0_2/90_2/0]_s$

表 1 有限要素解析に用いた CFRP 被着体の弾性特性

CFRP ($[0_2/90_2/0_2/90_2/0]_s$)		
Young’s modulus	E_x (GPa)	184
	E_y (GPa)	10
Shear modulus	G_{xy} (GPa)	6.1
Poisson’s ratio	ν_{xy}	0.32

表 2 有限要素解析に用いた金属被着体の弾性特性

Ti-6Al-4V		
Young’s modulus	E (GPa)	109
Poisson’s ratio	ν	0.28

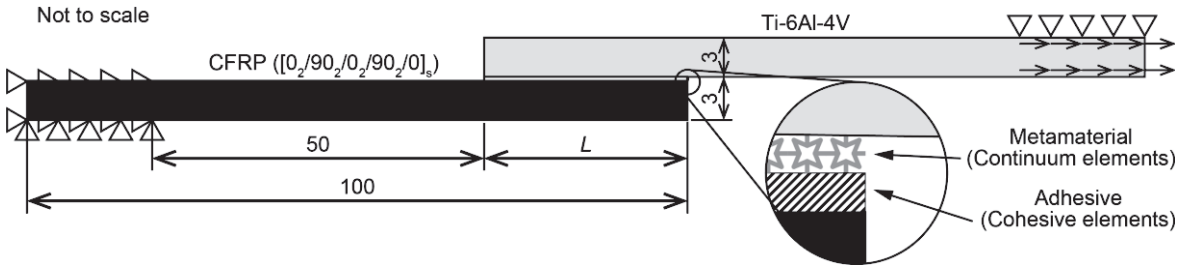

図 2 メタマテリアルを用いた接着継手の概要と有限要素モデル

表3 有限要素解析に用いた接着剤樹脂の特性

Adhesive (cohesive ele.)		
Mode I stiffness	K_{I} (MPa)	2500
Mode II stiffness	K_{II} (MPa)	920
Mode I peak stress	t_{Ic} (MPa)	49.5
Mode II peak stress	t_{IIc} (MPa)	37.9
Mode I fracture toughness	G_{Ic} (kJ/m^2)	2.71
Mode II fracture toughness	G_{IIc} (kJ/m^2)	7.76

の積層構成でモデル化した．解析モデルの寸法とCFRPの積層構成および境界条件は図2に示す通りである．ラップ長さLが12.5，25，50，100 mmの4種類のモデルを用意した．メタマテリアル部のヤング率Eとせん断弾性率Gのいずれか一方を10 GPaに固定し，他方を0.1～1000 GPaの範囲で変化させた．CFRPと金属の膨張率の違いに起因する熱応力を考慮するため，+100℃に相当する温度変化を与え，その後に引張負荷を与えた．

3．2　検討結果

図3および図4に接着接手の初期破壊応力および継手強度に及ぼすヤング率Eの影響をラップ長ごとに示す．なお，この時せん断弾性率Gは10 GPaである．ここで，初期破壊応力はいずれかの結合力要素の応力値が臨界値に達したときの公称せん断応力，継手強度は公称せん断応力の最大値であり，公称せん断応力は試験片に負荷した荷重をラップ部の面積で除したものである．なお，図中の破線（Control）はメタマテリアル部をモデル化せず，CFRPと金属被着体を直接接着剤で結合した場合の結果を表し，以降はこの値との比較からメタマテリアルが継手強度の向上に効果があるかを議論する．初期破壊応力はヤング率Eが大きい，または小さい場合に上昇した．一方，継手強度の場合でも初期破壊応力と比較して効果は小さいものの同様の傾向が見られた．これはヤング率Eが大きい場合には被着体そのもののピール変形（面外方向への変形）が抑制されたため，ヤング率Eが小さい場合には柔軟性により端部でのピール応力が緩和されたためであると考えられる．メタマテリアルは母材のヤング率（金属で最大200GPa程度）よりも高いものは作れないため，ヤング率が

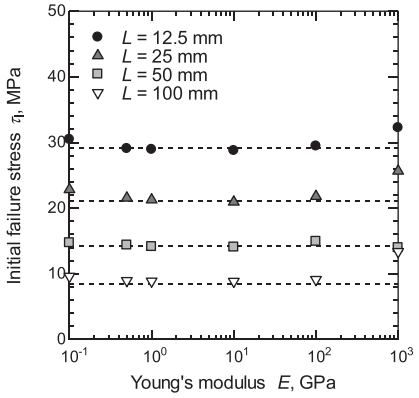

図3 初期破壊応力におよぼすヤング率の影響

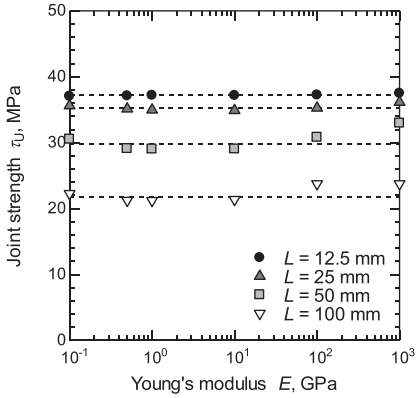

図4 継手強度におよぼすヤング率の影響

低いメタマテリアル（1 GPa未満）を採用するのが継手強度の向上には有効であると考えられる．

同様に，図5および図6に接着接手の初期破壊応力および継手強度に及ぼすせん断弾性率Gの影響をラップ長ごとに示す．なお，この時ヤング率Eは10 GPaである．ラップ長が12.5 mmの場合を除いてせん断弾性率Gが小さい場合に初期破壊応力が増加した．一方，極端にせん断弾性率Gが低い場合には荷重の伝達効率が低下するため，継手強度が低下した．以上より，継手強度の向上にはせん断弾性率Gが10 GP程度のメタマテリアルが望ましいと考えられる．

一般に金属材料や高分子材料をはじめとした連続体ではヤング率Eはせん断弾性率Gよりも高く，通常その割合は$E/G \approx 2.5$である．したがって，通常の材料ではせん断弾性率Gがヤング率Eよりも大きな材料を作り出すことは不可能である．以降は，この要件に合致するメタマテリアルの設計を試みる．

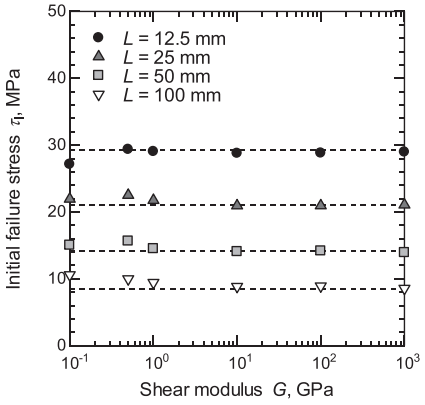

図5 初期破壊応力におよぼすせん断弾性率の影響

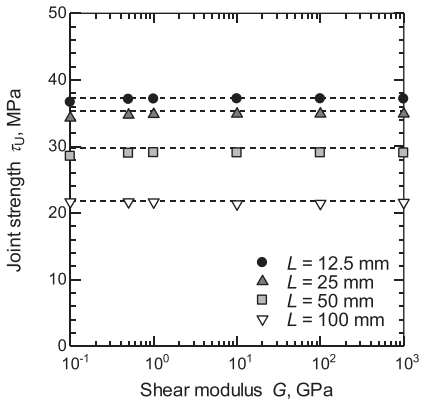

図6 継手強度におよぼすせん断弾性率の影響

4. メタマテリアルの等価弾性率

4.1 解析方法

面外方向のヤング率が小さく，それよりもせん断弾性率が大きいメタマテリアルを設計するため，均質化解析によりメタマテリアルの等価弾性率を計算した．解析には汎用有限要素解析ソフトウェア（Abaqus/Standard）を用いた．弾性論的な考えからヤング率に対して高いせん断弾性率を持つとされる負のポアソン比を有する星形と矢じり形のメタマテリアル（図7(a) と (b)）をモデル化した[7]．また，せん断変形を許容せず，面外方向の変形のみを許容する構造として鉄道用の集電装置（パンタグラフ）やラボジャッキから着想を得たひし形，Z 形のモデル（図 7 (c) ～(f)）もモデル化した．ひし形では部材間の角度と部材の太さを変えたモデルを作成した．Z 形は斜材の角度を変えたモデルを 3 種類作成した．すべてのモデルで高さは0.2 mm とし，ひし形のモデルを除いて部材の太さは 0.02 mm とした．モデルには積層造形によく用いられる低融点のアルミ合金（Al-10Si-0.4Mg）を想定した物性値（表4）を与えた．等方弾性体を仮定し，4 節点の平面応力要素を用いた．1 ユニットのメタマテリアルから弾性率を求めるには，モデルの周囲に周期的境界条件を付与する必要がある．ここでは，キー自由度法により[8],[9]，モデルの x 方向と y 方向に周期的境界条件を付した．図 8 に示すような解析対象に対して下記のような条件を有限要素法ソフトウェアに実装されている多点拘束の機能を用いて付与し，周期的境界条件を設定した．

表4 均質化解析に用いた母材の弾性特性

Al-10Si-0.4Mg		
Young's modulus	E (GPa)	70
Poisson's ratio	ν	0.33

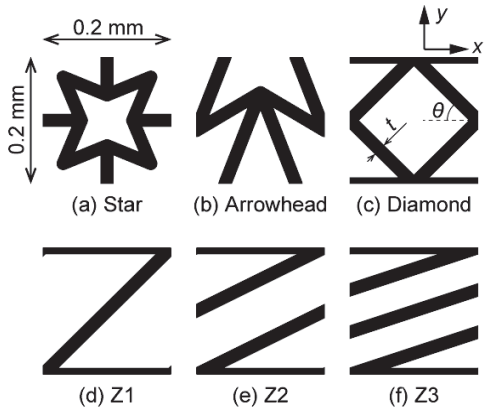

図7 解析対象のメタマテリアル

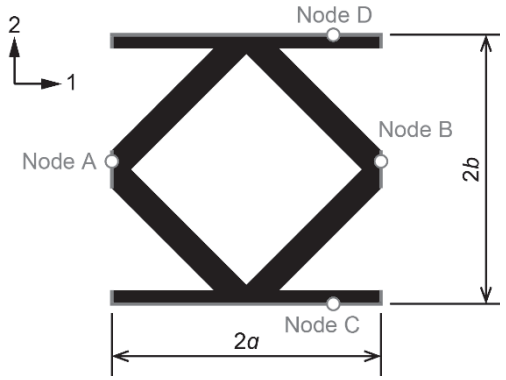

図8 周期的境界条件の概念図

A-B 間について

$$\left.\begin{aligned} u_1^B - u_1^A &= 2aE_{11} \\ u_2^B - u_2^A &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

C-D 間について

$$\left.\begin{aligned} u_1^D - u_1^C &= 2bE_{12} \\ u_2^D - u_2^C &= 2bE_{22} \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

ここで，u は変位を表し，下付き添え字は座標系に対応する自由度，上付き添え字は周期境界を設定する面に対応する．また，a と b は図 8 に示す 1 ユニットの寸法で，$E_{i,j}$は巨視ひずみである．$E_{i,j}=1$ としたときの周期境界を設定する面の反力（巨視応力）がその方向の弾性率に対応する．また，メタマテリアルは方向によって弾性率が異なる異方性を有するため，以降では弾性率に図 7 に対応する座標系を付してその方向を区別する．

４．２　解析結果

図 9 に有限要素解析で取得した各メタマテリアルのヤング率 E_y とせん断弾性率 G_{xy} をまとめる．星形と矢じり形では面外方向のヤング率 E_y がせん断弾性率 G_{xy} よりも大きくなった．一方ひし形や Z 形では G_{xy} が E_y よりも大きくなった．これはひし形や Z 型では斜材が連続しており，斜材が大きなせん断力を受け持つためであるためと考えられる．また，Z 形では斜材の角度が増加すると E_y が減少した．

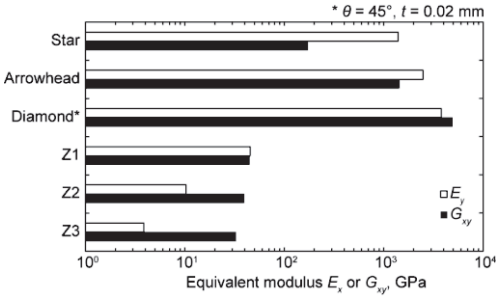

図 9 各メタマテリアルのヤング率とせん断弾性率

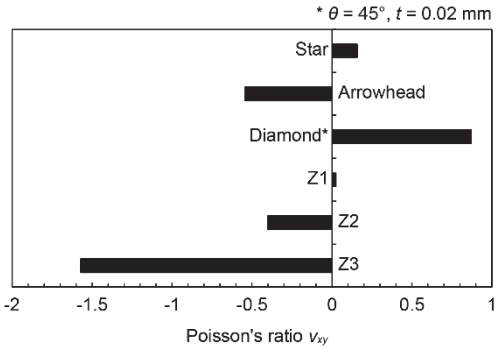

図 10 各メタマテリアルのポアソン比

各メタマテリアルのポアソン比 ν_{xy} を図 10 に示す．線形弾性体が示すポアソン比の理論値（−1～0.5）を超える範囲のポアソン比を示しているものあり，メタマテリアルが非常に特異な弾性特性を示すことが本検討の結果からも明らかになった．

ひし形の等価弾性率およびポアソン比に及ぼす部材間の角度 θ の影響を図 11 と図 12 に，部材太さ t の影響を図 13 と図 14 にそれぞれ示す．θ が大きくなるに従い，E_y，G_{xy} ともに増加した．しかし，E_y は G_{xy} よりも角度に敏感であるため，部材間の角度 θ によって E_y と G_{xy} の割合を自由に制御できることが確認された．また，ポアソン比 ν_{xy} は θ の増加に伴い大きく低下し，0 に収束した．一方，部材太さ t は E_y と G_{xy} をほぼ線形に変化させることから，部材太さ t によって E_y と G_{xy} の絶対値を変化させることができる．したがって，ひし形のメタマテリアルでは部材間の角度と太さによって，弾性特性を自由に制御で

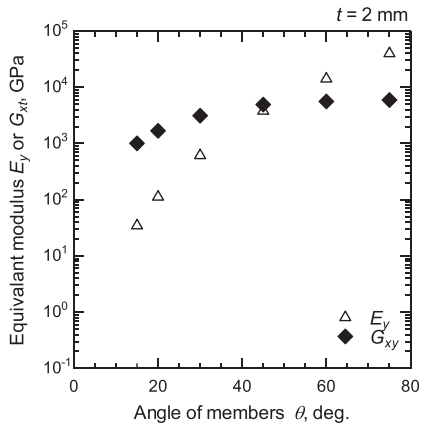

図 11 ひし形のヤング率とせん断弾性率に及ぼす部材間角度の影響

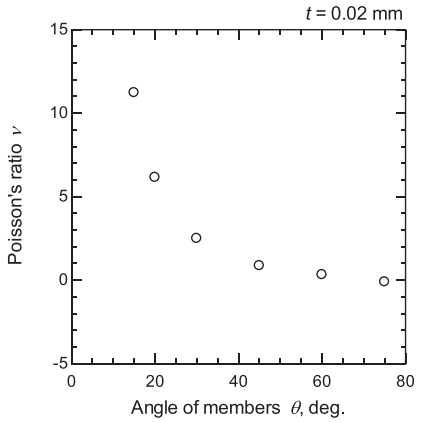

図 12 ひし形のポアソン比に及ぼす部材間角度の影響

きることが示された．ポアソン比 ν_{xy} は t に対しては鈍感であり，部材間角度 θ の影響をより強く受けることが明らかになった．

5．メタマテリアルを適用した単純重ね継手の損傷進展解析

最後に，単純重ね継手に均質化解析で取得したメタマテリアルの等価弾性率を導入した場合の損傷進展解析を行った．解析の条件は 3 章の予備検討と同様である．メタマテリアルの等価弾性率にはひし形の部材間角度 θ = 20°，部材太さ t = 0.02 mm のものを用いた．この時，E_y = 112.1 MPa，G_{xy} = 1680.3 MPa であった．初期破壊応力を図 15 に，継手強度を図 16 にそれぞれに示す．ラップ長が短い L = 12.5 mm と L = 25 mm の場合には，メタマテリアルを導入しない場合（control）と比較して強度がやや劣る場合もあったものの，ラップ長が長い L = 50 mm と L = 100 mm の場合には初期破壊応力，継手強度ともにやや増加した．L = 100 mm の場合には初期破壊応力が 19.4%，継手強度が 2.2%向上した．

図 17 にピール応力（面外方向応力），図 18 にせん断応力の分布を示す．なお，図の横軸は接着部の終端からの距離であり，メタマテリアルを導入しない場合の損傷発生時（同じ荷重を負荷したタイミング）での比較を行っている．ピール応力はメタマテリアルを導入することで特に端部で減少することが明らかになった．これにより，はく離の起点での応力を低減することが可能である．また，せん断応力は接着剤の破壊強度（37.9 MPa）の範囲内で増加しており，せん断応力の伝達効率が向上してことを示している．以上より，メタマテリアルを用いることで接着継手の強度向上が行える可能性が示唆された．

6．結　論

接着継手の信頼性向上を目的にメタマテリアルの適用性を検討した．金属被着体の表面にメタマテリアルを直接積層造形する場合には面外方向のヤング率が小さく，せん断弾性率がある程度大きいメタマテリアルが適していることが明らかになった．均質化法を用いた数値解析の結果，斜材が連続している部材が大きなせん断弾性率を有するとともに，その角度と太さによって面外方向のヤング率とせん断弾性率の比ならびに絶対値を自由に制御できることが明らかになった．等価弾性率を用いた単純重ね継手の損傷進展解析の結果，メタマテリアルを用いることで応力分布を変化させることができ，継手強度の向上が見込まれることが示唆された．

発表論文

[1] 大島草太，小笠原俊夫，K-T Tan，接着継手の応力集中の緩和を目的としたメタマテリアル適用の検討，第 63 回構造強度に関する講演会，オンライン開催，(2021/8)．

[2] 大島草太，メタマテリアルを用いた接着継手の応力集中緩和，2021 年度日本接着学会関東支部若手交流会，オンライン開催，(2021/12)，(招待講演)．

[3] S.Oshima, T.Ogasawara, K.-T. Tan, Improvement of mechanical properties of adhesively bonded joints using metamaterials, 46th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (ICACC2022), online, (2022/1).

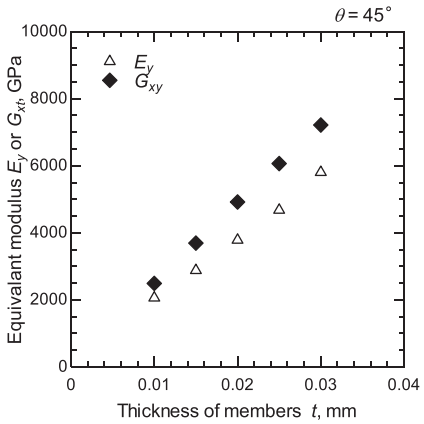

図 13 ひし形のヤング率とせん断弾性率に及ぼす部材太さの影響

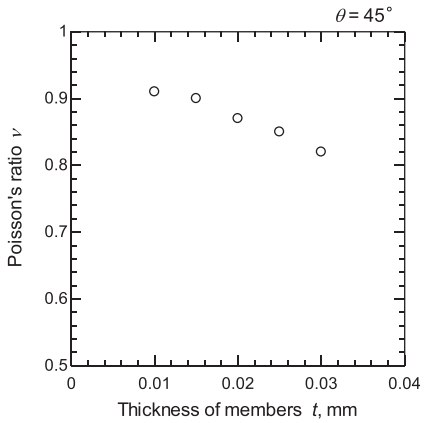

図 14 ひし形のポアソン比に及ぼす部材太さの影響

参考文献

（1） Y.Sekiguchi, M.Nakanouchi, K.Haraga, I.Takasaki, and C.Sato, Experimental investigation on strength of stepwise tailored single lap adhesive joint using second-generation acrylic adhesive via shear and low-cycle shear tests, International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol.95, (2019/12) p.102438.

（2） L.R.Meza, S.Das, and J.R.Greer, Strong, lightweight, and recoverable three-dimensional ceramic nanolattices, Science, Vol.345, Issue 6202, (2014/9) p.1322-1326.

（3） T.Frenzel, M.Kadic, and M.Wegener, Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist. Science, Vol.358, Issue 6366, (2017/11) p.1072-1074.

（4） A.Behroozfar, S.Daryadel, S.R.Morsali, S.Moreno, M.Baniasadi, R.A.Bernal, and M.Minary-Jolandan, Microscale 3D printing of nanotwinned copper, Advanced Materials, Vol.30, Issue 4, (2017/12) p.1705107.

（5） T.Sumigawa, T.Sueda, Y.Futamura, M.Suzuki, and T.Kitamura, Effect of interface layer consisting of nanosprings on stress field near interface edge, Engineering Fracture Mechanics, Vol.76, Issue 9, (2009/6) p.1336-1344.

（6） T.Sumigawa, H.Hirakata, M.Takemura, S.Matsumoto, M.Suzuki, and T.Kitamura, Disappearance of stress singularity at interface edge due to nanostructured thin film, Engineering Fracture Mechanics, Vol.75, Issue 10, (2008/7) p.3073-3083.

（7） X.Hou and V.V.Silberschmidt, Metamaterials with negative Poisson's ratio: a review of mechanical properties and deformation mechanisms in V.V.Silberschmidt and V.P.Matveenko Eds, Mechanics of Advanced Materials: analysis of properties and performance, Springer, (2015/4) p.155-180.

（8） S.Li, N.Warrior, Z.Zou, and F.Almaskari, A unit cell for FE analysis of materials with the microstructure of a staggered pattern, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.42, Issue 7, (2011/7) p.801-811.

（9） 吉田啓史郎，仲上元博，層内不均質性を考慮した平織複合材料積層板の曲げ剛性および面外せん断剛性の解析，日本複合材料学会誌，Vol.42，No.1，(2016/1) p.2-12.

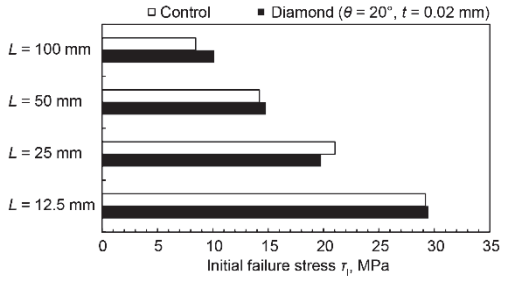

図15 メタマテリアルを導入した接着継手の初期破壊強度

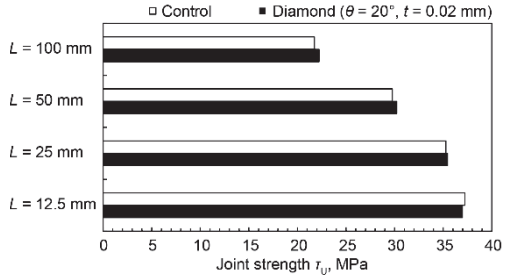

図16 メタマテリアルを導入した接着継手の継手強度

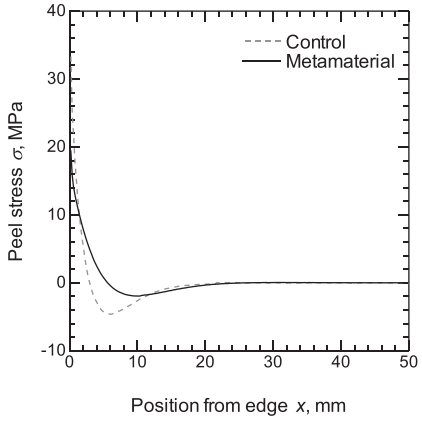

図17 メタマテリアルを導入した接着継手のピール応力分布

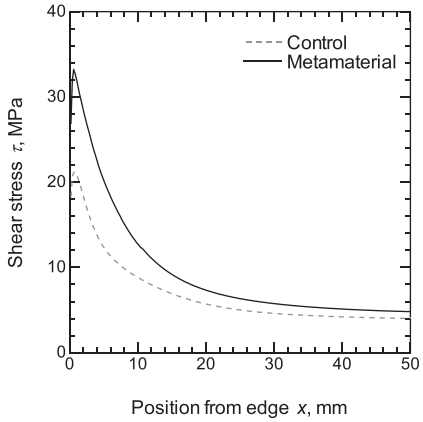

図18 メタマテリアルを導入した接着継手のせん断応力分布