

令和 3 年 8 月 25 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01275

研究課題名(和文)低温大気圧ハイブリッド接合によるセンサ内包軽量構造材料の開発

研究課題名(英文)Lightweight and Smart Hybrid Materials by Low Temperature Ambient Bonding

研究代表者

重藤 暁津 (SHIGETOU, Akitsu)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・主幹研究員

研究者番号：70469758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,100,000円

研究成果の概要(和文)：1) 電子基板・移動体に共通して用いられる有機・無機材料について、組み合わせを問わず150℃程度以下・大気圧窒素雰囲気中でほぼ直接接合を得られる手法を確立した。2) 水やアンモニアなどの簡素な溶剤蒸気を含む窒素雰囲気中で紫外光を照射するプロセスで、架橋層厚を調整して高強度界面を形成し、接合達成機構を明らかにした。3) 軽量ハイブリッドかつスマートな構造材料の基礎的事例として、有機構造材と圧延チタン箔の界面に薄型ひずみセンサを内包する構造を当該手法で製作し、実働を確認した。4) 当初計画にはなかったが、有機無機ハイブリッド接合体の耐水性に資する界面構造設計の可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：1) 有機・無機材料のほぼ直接界面の接合達成メカニズムの解明は他に例を見ず、電子顕微鏡観察データなどを蓄積すれば、次世代複合材料の計算機設計の促進などに資する。2) 軽量かつスマートな構造材料の基礎的な実現性を示したことで、AI自動運転時代の移動体のデザインや運用概念が多様化される。社会的意義：1) 低温大気圧雰囲気で行う可能なハイブリッド接合手法は工業的に簡易なことから、異なる分野横断的に適用可能で、従来を超えた機能を有する新規な複合材料の開発が促進される。

研究成果の概要(英文)：1) Organic-inorganic hybrid bonding without high temperature and vacuum was realized for electronics packaging materials and automotive structural materials. 2) In novel bonding method, the vacuum ultraviolet irradiation in humidified nitrogen enabled the surface cleaning, partial deoxidization of native oxide, and ultrathin bridge formation, via single process (V-VUV method). Different bridge structures were available by using such as water and ammonium solution, and the thickness was tunable to obtain sufficient interdiffusion for cohesive fracture. 3) As a basic prototype of "lightweight and SMART structural material," a hybrid body, which was composed of rolled Ti foil and PEEK and a resistance-change strain sensor substrate amid, was structured by means of V-VUV method. 4) Although it was beyond the original plan, a feasibility of water-proof bridge structure at the organic-inorganic interface was shown.

研究分野：電子実装

キーワード：接合 ハイブリッド 低温大気圧 電子実装 構造材料 表面・界面

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自動車を代表とする移動体においては、昨今、外殻の一部を炭素繊維強化ポリマー (CFRP) と金属の組み合わせに置き換え、軽量化による燃費向上と低炭素化が図られている。このような軽量ハイブリッド構造材料は、従来の溶接や摩擦攪拌などの加熱溶融を伴う手法で異材を接着・接合して製造されることが多い。これらの製造手法は工業的に成熟しており、メートル級の大面积接合を比較的 low コストで実行するのに優れている。しかし、機械的な接合により形成された異材界面は単一材料内部と比較して明らかに疎な構造を有しており、移動体の実働環境で不可避な機械的振動や熱による応力集中箇所や、油分や水分の侵入経路となりやすく、主な破断進展経路になることが多い。軽量ハイブリッド構造材料の信頼性担保のためには、異材界面付近での高い初期故障検知能力が必要である。同時に、移動体内部には、運転者の操作性快適性向上のための様々な電子基板・センサ群が実装されており、一般車製造コストに占める電装品の割合は 20-40% にも達している。移動体 Internet of Things (IoT) では、人体や周辺環境からもたらされた異種信号をデバイスで検知増幅し、外殻の構造材料を通してクラウドに繋ぐまでの一連の伝送を継ぎ目なく高速で行うことが理想であるが、移動体を構成する材料に用いられるアSEMBリの手法は工業分野 (材料スケール) により全く異なり、界面形成メカニズムの違いがそのまま信号伝送損失につながっている状況がある。電子基板材と構造材には共通したものが多いにも関わらず、多くの場合、電装品は手で扱えるサイズの機械的モジュールを接着剤やビス止めなどの機械的方法で構造材料に装着しているのに対し、内部の基板群は半導体微細加工技術を利用したマイクロメートルレベルの微細接合によりパッケージされている。異種材料への汎用性と、既存工業分野にも横断的に適用可能性を持つハイブリッド接合手法が必要で、その実現により、図 1 に示すような“軽量ハイブリッドかつスマートな構造材料”が得られる。このような構造では、基板群全面が構造材と密着を確保することで機械的信頼性が向上するほか、金属構造材側への放熱により熱的課題もある程度解決が期待される。

このようなハイブリッド一括接合技術の最も大きな課題が、プロセス低温化と脱真空雰囲気との 2 つである。温度については、有機材料のガラス転移温度以下程度に抑えることが望ましい。このような温度は明らかに材料の変形・反応能が小さい領域であるので、材料表面間に十分な接合性を発現させる工夫が必要である。電子実装分野では一般的な真空雰囲気などの特殊環境が、構造材料分野の既存の製造ラインに導入が難しいことを鑑みると、材料表面の結合状態を制御して、母材由来の極薄化合物層を介した強固な結合が形成される機構を、低温大気圧雰囲気を実現する工程が求められる。大気圧雰囲気で材料初期表面を改質する場合、表面への何らかの分子の再吸着が避けられないので、この吸着分子層の構造を制御して架橋能を発現させるほうが現実的である。また、架橋層の厚さは接合プロセスならびに実働環境の温度範囲で十分に母材どうしの相互拡散が進行し得る程度の薄さ (10nm 程度) であることが望ましい。これは、経時的な拡散により粒界状の明確な異相界面が消失し、傾斜層的な構造を形成して安定して機械的強度が向上し、配線金属の接合界面の場合は十分な導電性が確保できることが理由である。

### 2. 研究の目的

ハイブリッド構造材料と可撓性電子基板材料の両方に用いられる代表的なものとして炭素繊維強化ポリマーのマトリックス材であるポリエーテルエーテルケトン (PEEK)、ポリイミド (PI)、Ti、Fe、Cu、Al、各種半導体基板を挙げ、これらの表面に 150°C 程度以下、大気圧雰囲気で一括して接合性を発現させ、接合と同時に高信頼性に資する界面構造を創製できる接合手法を確立する。具体的には、水やアンモニアのような、簡易で環境負荷の低い溶剤蒸気を含む窒素雰囲気や紫外光 (VUV) を照射し、溶剤分子が解離して生じるラジカル種の化学反応を併用することで、VUV のみでは表面改質が困難であった無機材料にも汎用的に極薄架橋層を形成する。そのために、架橋形成挙動ならびに界面形成過程の解明と、応用可能性評価を行う。また、確立された接合手法を用い、“軽量かつスマートな構造材料”の基本的な実働試料や、将来の大面积化に備えた接合機構を試作し、応用可能性を実証する。本研究は科研費基盤 B26289112 を発展適用するもので、電気的機能を内包する高信頼性軽量構造材料を実現することで、AI 化が進む移動体のデザインや運用概念の多様化に対応することが期待される。

### 3. 研究の方法

#### (1) 概要

本研究は 4 年間をかけて実行した。平成 29 年度は、図 2 に示した VUV を用いた低温大気圧接合手法について、各試料に対するプロセス条件最適化を行った。環境負荷の低さやプロセス簡易性の観点から、架橋性を発現する物質として水やアンモニアの電離種を選定し、蒸気密度と VUV 照射時間の積を露出量 ( $s \cdot \text{kg}/\text{m}^3$ ) と定義し、露出量と材料表面の化学結合状態変化の関係を、X 線光電子分光計 (XPS) などを用いて定量化した。平成 30 年度は、前年の結果に基づき基礎的な接合実験ならびに界面微細構造の解析を、透過電子顕微鏡などを用いて行い、接合達成のメカニズムを明確にした。また、基礎的な強度試験を施してハイブリッド接合界面の真の強度や破断進展過程を考察した。また、平成 30 年から 31 年度にかけて、将来の大面积化への展開可能性検証のための

Role to Role 接合装置を試作した。平成 31 年から令和元年度にかけては、有機構造材料側にセンサパッケージを内包した構造を製作し実働性を検証した。これらの検討は、早稲田大学の研究分担者のほか、国立台湾大学大学院の連携研究者の協力の下で遂行された。

#### (2) 高信頼性低温大気圧接合手法の確立

各試料に対し、架橋層形成プロセスウィンドウを決定した。プロセスウィンドウとは、全表面的に架橋薄膜が形成され、かつその厚さが所定の接合温度・時間範囲内での母材原子の体積拡散距離よりも小さいことが保たれる表面改質条件群を指す。検討には、申請者が先行研究で製作改良した接合・表面分析装置を用いた。本装置は、XPS、高純度窒素ラインを含む溶剤霧化導入装置、高真空中での Ar 中性原子ビーム衝撃装置がそれぞれ高真空チャンバに封入され、加熱ステージを有するフリップチップ接合装置と接続された構造を有する。この装置を用い、各種溶剤蒸気について、異なる露出量条件で表面改質した前後の化学結合状態ならびに架橋層厚の変化を、XPS 角度分解法で算出した。必要に応じて、従来の高真空雰囲気と完全に活性化した試料との比較も行った。

#### (3) 接合性能の評価

最適表面改質プロセス条件を用いて単純平板試料を接合し、接合界面の微細構造解析を行った。架橋層内部と母材の界面の構造分析により、接合達成のメカニズムを考察した。接合達成直後の極薄架橋層は周辺領域とは異相になり、架橋層内部では接合達成後も経時的に常温でも母材原子の相互拡散が発生することが当初推測されたので、この界面構造の安定化挙動を透過電子顕微鏡（以下 TEM）ならびに電子エネルギー損失分光計（以下 EELS）を用いて観察した。また、基礎的な接合性能評価を行った。接合強度に関しては、連続的に上昇する荷重を界面に一点印加して得た破断面を光学顕微鏡観察することで得られる“見かけ”の接合面積を利用して図 3 のように真の接合強度を見積もった。a) 見かけの接合面積に一定の係数をかけたものを真実接触面積とし、b) 接合が達成領域以外に既にクラックが進展したとみなし、c) 接合領域内部に向かってクラックが進展するために必要なクラック端開口エネルギーすべてが、この接合領域を分離して 2 つの新しい表面を創製するために消費されると仮定した。経時的信頼性に関しては、85°C85%RH 高温高湿度試験を通して評価した。

#### (4) 応用可能性の検討

応用可能性の基礎的な評価として、以下の 3 点について装置や試料を試作して実働を確認した。a) 内部破断進展観察用装置：破断進展観察については前項の通り。b) A4 レベルサイズ試料の Role to Role 接合装置：一般大気中での接合性確認。c) 図 4 のように、実際の工業用途圧延金属と PEEK の界面に抵抗変化型歪センサを内包し、歪検知を確認した。

### 4. 研究成果

#### (1) VUV を用いた低温大気圧接合手法の確立と接合性能の評価

VUV を用いた表面改質の有効性を示すため、PEEK 表面に対し、従来の高真空手法である Ar 高速原子ビーム衝撃 (Ar fast atom beam, Ar-FAB) による表面活性化を行った場合と、波長 172 nm の VUV を照射した場合の最表面の化学結合状態の変化を、XPS で測定した価電子帯近傍のスペクトルで比較した結果を図 5 に示す。Ar-FAB の物理的衝撃の場合は、VUV 照射の場合と比較して明らかに表面改質後のスペクトルがブロードな単一の波形になっている。高分子の価電子帯波形は複雑になりがちであるが、図中に示したピーク位置の官能基同定事例を参照すると、PEEK 中の酸素部分が離脱して高分子鎖が断片化し、ベンゼン環主体の C 濃縮が発生していると考えられる。同様の現象は他の有機材でも確認されている。従来の半導体微細加工において、表面改質の目的で Ar-FAB のようなビームプロセスを施した後に、有機基板の絶縁性が低下したり、表面にひび割れが生じたりする問題が発生するケースは、このような物質の最表面と内部の構造の違いに起因することが多い。有機材料表面の電氣的・機械的特性を維持することが重要な材料の組み合わせの場合は、材料の昇温の問題が小さいことも含めて、より結合構造へのダメージの小さい VUV などの光を用いた表面改質プロセスが適していると言える。

無機材料を含めた低温大気圧ハイブリッド接合の達成には、異種材料に汎用性を有する極薄架橋層の形成が不可欠で、架橋層になりえる代表的な構造は水酸基やアミノ基などが挙げられる。VUV を用いた低温大気圧接合手法の概要は図 2 に示した通りであるが、本手法は、無機酸化物が水和しやすいことや、電子実装分野で Si ウエハの親水化接合技術などが成熟していて設備基盤が整っていること、ならびに環境負荷やプロセスコストを最も低く抑えることができる方法の一つであることから提案されている。本研究では、比較的高いエネルギーを有する VUV (波長 172 nm) を選択し、大気圧照射雰囲気には波長 172 nm の VUV で不活性な窒素を用いた。VUV 照射で水やアンモニア分子が解離することにより H, OH に加えて NH ラジカル種などが発生し、VUV 自体のエネルギーによる有機コンタミの除去のほか、無機材料自然酸化物の一部還元と、それにより露出した陽イオンサイトへの水和物もしくは窒酸化物形成が連続的に発生する。その後架橋を形成した表面どうしを常温で接触させ、まず水素結合による一定の結合強度を得る。その状態で加熱することにより脱水縮合が発生し、酸素を介した強固な共有結合に界面が変化する。架橋物質として水を使った場合、すなわち無機水和物を架橋として用いた場合は、XPS 狭帯域分析で得た O1s スペクトルを波形分離して配位分子水に相当するピークを抽出すると架橋形成有無の判別をつけやすい。そのほか、

Cu など配線金属に用いられる遷移金属の一部については、金属・酸化物・水酸化水和物の形成が LMM オーギュエピークの形状変化から明確に判別できるので、O1s スペクトルがノイズな場合に有用である。水和物以外の物質を架橋に選定した場合も同様で、例えば母材が窒化物であるのに対しアミノ基を有する構造を架橋に用いた場合は、N1s スペクトルを分離して得られる N-H 結合ピークの強度変化から架橋形成の評価が可能である。水和物架橋の場合の架橋層成長挙動測定例と接合事例を図 6 に示す。接合試料は Ti とポリジメチルシロキサン (PDMS) もしくは PEEK で、右図は Ti 表面における露出量と水和物架橋などの表皮層厚の関係を示す。層厚は XPS 角度分解法で取得した O1s スペクトルを波形分離した分子水ならびに酸化物由来酸素ピークの面積強度の比を用いて算出された。また、比較として、高真空中で VUV 照射のみ 300 s 行った結果も併記した。VUV 照射のみの結果は、便宜上グラフの露出量 = 0 の軸上にプロットしてある。図から、灰色線で示されている架橋由来の水和物の層厚が露出量に比例して増加している様子がみられる。左図の TEM 像は接合直後の界面を表しているが、接合直後にはどの材料の組み合わせでもアモルファス状の架橋層が明確に残存することが多い。しかしその層厚が十分に薄いため経時的に拡散が進行し、一定の厚さの傾斜層的な層を形成して界面は安定化する挙動が確認されている。図 7 に示す Al と PI の接合界面の透過電子顕微鏡像のように、この拡散挙動は主に無機材料表面の安定な化合物層側から発生するもので、例えば酸化物の場合は、酸化物中の酸素が V-VUV プロセス中に発生するプロトンにより引き抜かれて生じた陽イオンの余剰分と、脱水縮合反応で発生した微量の水分子の相互作用により引き起こされる。このような拡散挙動により、接合直後に見られた直線状の異相界面は、経時的に消失するため、応力が界面近傍に印加されたときの明確な破断進展経路がなくなり、接合体は母材の凝集破断と同等の強度を発揮する。図 3 のモデルを用い、Fe-Al 接合界面について凝集破断部分の真の接合強度を見積もったケースでは、クラック進展が Al 内部で発生した現象を説明するために、実接合部と未接合部を含む見かけの接合界面のひずみエネルギー開放率  $G_i$  は以下のように求めた。 $L_{Fe}$  と  $L_{Al}$  はそれぞれ Fe, Al 試料片厚さ、 $P$  を実際の試験での破断荷重、 $\sigma$  を  $P$  を見かけの接合達成領域面積  $S$  で割った値とした。 $G_i$  は真実接合部の値  $G_{real}$  とある定数  $W$  を用いて  $G_i = W \cdot G_{real}$  と表現され、 $0 < W < 1$  である。また、 $E_{Al}$  と  $E_{Fe}$  は Al と Fe のヤング率である。大まかではあるが、この計算モデルで表面間を離断し、一對の新生面を創製するのに必要なエネルギーを見積もったところ、Al 水和物のそれとほぼ同等であることが判明した。したがってこの系では、V-VUV 手法で形成された Al 水和物架橋内から優先的に破断が発生したものと推測され、SEM 像で観察された実際の破断現象を傍証した。これらの結果から、接着剤などを用いないほぼ直接接合界面でも、高信頼性 (強度) な接合が獲得できることが明らかになった。

## (2) 応用可能性の検証ならびに発展検討

研究の方法第 4 項に示したように、大面積化や実働センサ基板を内包した軽量かつスマートな構造材料の実現性の基礎的検証のための装置、試料を試作した。Role to Role 接合装置では、VUV を用いた低温大気圧表面改質手法を施し、準安定状態になった試料を大気中で設置し、接合性が得られることを確認した。また、図 8 に示すように、圧延 Ti 箔と PEEK の界面に、ポリプロピレンなどの可撓性基板に Cu 配線を施した薄型歪センサを一括接合した構造について、歪検知能力を有することを確認した。さらに、図 2 の接合手法において、エタノールなどの低級アルコールを用いた場合は、親疎水性を制御可能な架橋が形成され、界面の耐水信頼性を向上できる可能性があることを見出した。本件は、2021 年度科研費基盤 S の応募に発展し、ヒアリング課題に採択されている。

図表：

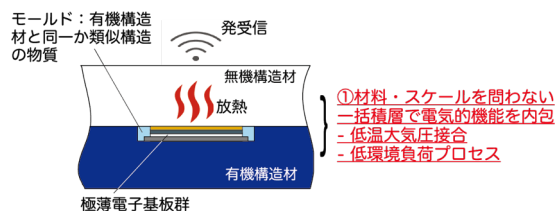


図 1 軽量ハイブリッドかつスマートな構造材料の概念。

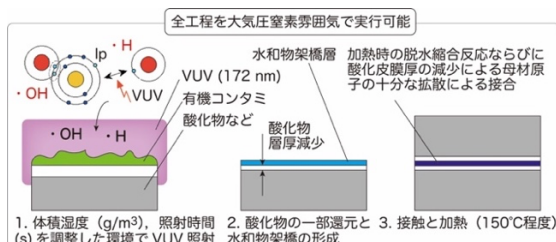
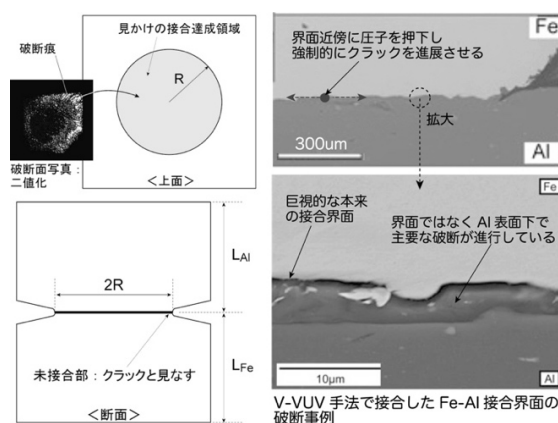


図 2 VUV を用いた低温大気圧ハイブリッド接合手法の概要。図は水和物架橋の場合。アンモニアの場合は NH, 低級アルコールでは CH ラジカルが追加で発生する。



$$\frac{\sigma^2}{2E_{Al}} \cdot L_{Al} \cdot \pi R^2 + \frac{\sigma^2}{2E_{Fe}} \cdot L_{Fe} \cdot \pi R^2 = 2G_i \cdot \pi R^2$$

図 3 真の接合強度を見積もる計算モデル。Fe と Al の例。凝集破断痕を中央に集積して接合部とし、その外部をクラック既進展部と仮定。クラック先端開放に要するエネルギーが全て新生面創製に消費されるとした。



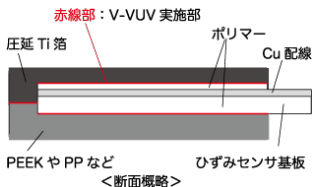


図 4 応用可能性評価のために試作した薄型センサ内包ハイブリッド接合体の断面構造概略. ポリプロピレンなどの可撓性基板に Cu インクで配線描画した抵抗変化型歪センサ (厚さ 50 $\mu$ m 程度) を, 座ぐりした PEEK と工業用圧延 Ti 箔の間に配置し, 本研究で提案した接手法で一括構築した.

ピーク (eV)	原子軌道	官能基
27.0 (23-31)	O2s, C2s	-O-C-, O=C
20.5 (19-23)	C2s, O2s	-C=C-(benz), C-O-, C=O
17.5 (16-19)	C2s, O2s	-C=C-(benz), C-O-, C=O
14.0 (11.5-16)	C2s, O2p, C2p	-C=C-(benz), -C-O-, -C-O-, -C=C-(benz)
9.5 (5-11.5)	C2p, O2p, C2s	C-O-, C=O, -C=C-(benz), -C=O-, -O-, =O
3.5 (2-5)	O2p, C2p	-C=C-(benz)

K. Endo et al. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 68 (1995) 528 などから

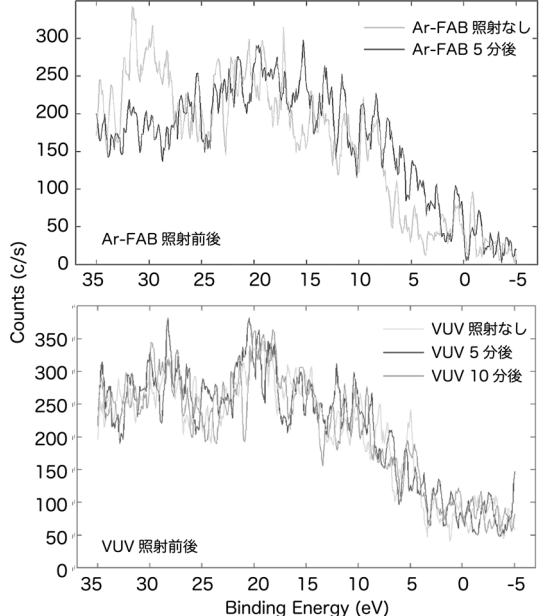


図 5 VUV を用いた接手法の有効性を示す XPS 価電子帯近傍のスペクトル. PEEK に対し, 従来の高真空中ビームプロセスを施した場合と, 本研究で用いた VUV 照射を行った場合では, 有機材主鎖断片化による最表面の化学結合状態が明確に異なることがわかる.

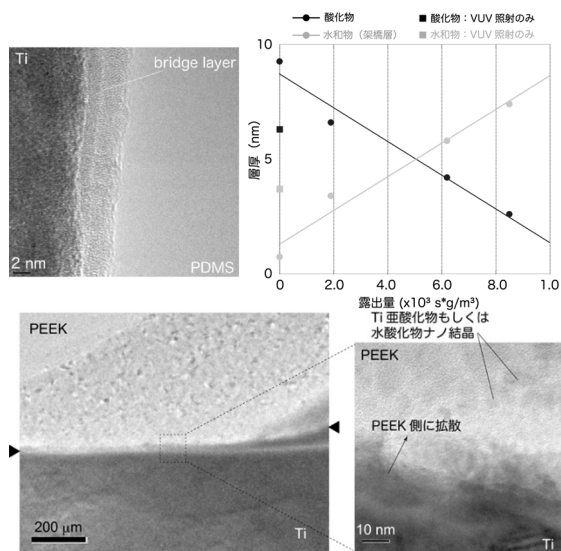


図 6 VUV を用いた低温大気圧接手法による各種試料のハイブリッド接合事例, ならびに露出量に対する架橋層厚変化の事例. 厚さ数 nm の架橋層を介して接合が達成されている.

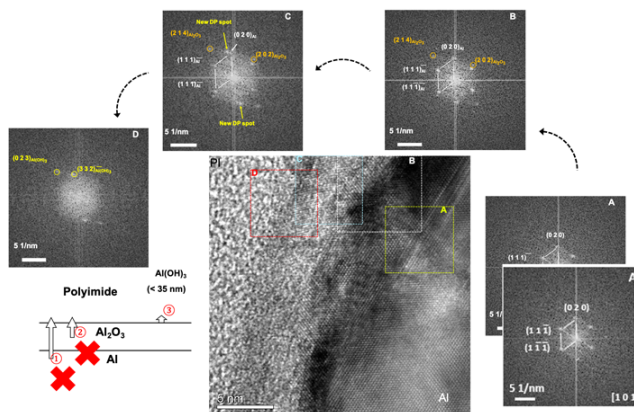


図 7 Al と PI の接合界面の例. 85°C85%RH 高温高湿環境に半年維持した試験後のもの. 界面は一定の厚さの傾斜層を形成して安定化し, 密着が保たれていることがわかる.

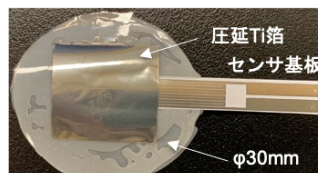


図 8 工業用圧延 Ti 箔と有機構造材の間に厚さ 50 $\mu$ m 程度のセンサ基板をはさみ一括接合したもの. 表面改質後, 大気雰囲気中で加熱加圧して接合を達成した. 本研究では手で試料を屈曲しながら小型電源でプロービングしやすいように数 cm 程度の大きさにとどめているが, より大型化も可能.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Chiu Y.S., Kao C.R., Shigetou A.	4. 巻 195
2. 論文標題 Different interfacial structures of Cu/In obtained by surface activated bonding (SAB) in vacuum and vapor-assisted vacuum ultraviolet (V-VUV) at atmospheric pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials & Design	6. 最初と最後の頁 109065 ~ 109065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matdes.2020.109065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hideki T. Miyazaki, Takaaki Mano, Takeshi Kasaya, Hirota Osato, Kazuhiro Watanabe, Yoshimasa Sugimoto, Takuya Kawazu, Yukinaga Arai, Akitsu Shigetou, Tetsuyuki Ochiai, Yoji Jimba, Hiroshi Miyazaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Synchronously wired infrared antennas for resonant single-quantum-well photodetection up to room temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-14426-6 2019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yang Tilo H., Kao C. Robert, Shigetou Akitsu	4. 巻 9
2. 論文標題 Organic-Inorganic Solid-State Hybridization with High-Strength and Anti-Hydrolysis Interface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-37052-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 重藤 暁津, 並木尚己	4. 巻 118
2. 論文標題 次世代パワー半導体用接合技術の動向	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 YANO E Plus	6. 最初と最後の頁 73 - 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fu Weixin, Shigetou Akitsu, Shoji Shuichi, Mizuno Jun	4. 巻 79
2. 論文標題 Low-temperature direct heterogeneous bonding of polyether ether ketone and platinum	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: C	6. 最初と最後の頁 860 ~ 865
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msec.2017.05.058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yang Hong-Wei, Kao C. Robert, Shigetou Akitsu	4. 巻 33
2. 論文標題 Fast Atom Beam- and Vacuum-Ultraviolet-Activated Sites for Low-Temperature Hybrid Integration	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 8413 ~ 8419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.7b02010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hainey Mel F., Mano Takaaki, Kasaya Takeshi, Jimba Yoji, Miyazaki Hiroshi, Ochiai Tetsuyuki, Osato Hiroataka, Watanabe Kazuhiro, Sugimoto Yoshimasa, Kawazu Takuya, Arai Yukinaga, Shigetou Akitsu, Miyazaki Hideki T.	4. 巻 29
2. 論文標題 Patchwork metasurface quantum well photodetectors with broadened photoresponse	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 59 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/oe.408515	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hainey Mel F., Mano Takaaki, Kasaya Takeshi, Ochiai Tetsuyuki, Osato Hiroataka, Watanabe Kazuhiro, Sugimoto Yoshimasa, Kawazu Takuya, Arai Yukinaga, Shigetou Akitsu, Miyazaki Hideki T.	4. 巻 9
2. 論文標題 Systematic studies for improving device performance of quantum well infrared stripe photodetectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 3373 ~ 3384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2020-0095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hainey Mel F., Mano Takaaki, Kasaya Takeshi, Ochiai Tetsuyuki, Osato Hirotaka, Watanabe Kazuhiro, Sugimoto Yoshimasa, Kawazu Takuya, Arai Yukinaga, Shigetou Akitsu, Miyazaki Hideki T.	4. 巻 9
2. 論文標題 Near-field resonant photon sorting applied: dual-band metasurface quantum well infrared photodetectors for gas sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 4775 ~ 4784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2020-0456	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 SHIGETOU Akitsu	4. 巻 89
2. 論文標題 Hybrid Bonding in Ambient Atmosphere for Automotive IoT	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY	6. 最初と最後の頁 438 ~ 446
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2207/jjws.89.438	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyazaki Hideki T., Mano Takaaki, Kasaya Takeshi, Osato Hirotaka, Watanabe Kazuhiro, Sugimoto Yoshimasa, Kawazu Takuya, Arai Yukinaga, Shigetou Akitsu, Ochiai Tetsuyuki, Jimba Yoji, Miyazaki Hiroshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Synchronously wired infrared antennas for resonant single-quantum-well photodetection up to room temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-14426-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yang Tiilo H., Chiu Yu-Shan, Yang Ching-Yun, Shigetou Akitsu, Kao C. Robert	4. 巻 12
2. 論文標題 Polyimide-Polyetheretherketone and Tin-Polyimide Direct Bonding via Ethanol-Assisted Vacuum Ultraviolet Irradiation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5104/jiepeng.12.e19-012-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する



1. 著者名 Weixin Fu, Akitsu Shigetou, Shuichi Shoji, Jun Mizuno	4. 巻 7
2. 論文標題 Low Temperature Direct Bonding between PEEK (Polyetheretherketone) and Pt via Vapor-Assisted Vacuum Ultraviolet Surface Modification	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Materials Science and Engineering B	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17265/2161-6221/2017.3-4.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計24件 (うち招待講演 14件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Yu-Shan Chiu, Robert Kao, Akitsu Shigetou
2. 発表標題 Lead-free and Fluxless Indium Solder Bonding Process in Low Temperature through Vacuum ultraviolet (VUV)
3. 学会等名 11th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 重藤 暁津
2. 発表標題 IoTに向けた軽量ハイブリッドかつスマートな構造材料のための接合技術
3. 学会等名 (社)エレクトロニクス実装学会2019修善寺ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu-Shan Chiu, SHIGETOU, Akitsu, Robert Kao
2. 発表標題 Low Temperature and Fluxless Bonding Process of Cu-In through VUV
3. 学会等名 2019 Taiwan-Japan Workshop on Electronic Interconnection (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akitsu Shigetou, Tilo Hong-Wei. Yang, Robert Kao
2. 発表標題 Hybrid Bonding in Ambient Atmosphere for 3D Integration
3. 学会等名 The IEEE International 3D Systems Integration Conference (3DIC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 MIYAZAKI, Hideki, MANO, Takaaki, KASAYA, Takeshi, OOSATO, Hiroataka, 渡邊 一弘, SUGIMOTO, Yoshimasa, KAWAZU, Takuya, OCHIAI, Tetsuyuki, ARAI, Yukinaga, SHIGETOU, Akitsu
2. 発表標題 Metamaterial quantum well infrared photodetectors based on plasmon-enhanced intersubband transition
3. 学会等名 The 7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 MIYAZAKI, Hideki, MANO, Takaaki, KASAYA, Takeshi, OOSATO, Hiroataka, 渡邊 一弘, SUGIMOTO, Yoshimasa, KAWAZU, Takuya, OCHIAI, Tetsuyuki, ARAI, Yukinaga, SHIGETOU, Akitsu
2. 発表標題 Metasurface Quantum-well Infrared Photodetectors
3. 学会等名 The Fourth A3 Metamaterials Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 SHIGETOU, Akitsu
2. 発表標題 Inorganic-Organic Low Temperature Hybrid Bonding with Anti-Hydrolysis Interface
3. 学会等名 The 20th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 重藤 暁津
2. 発表標題 軽量ハイブリッドかつスマートな構造材料創製のための低温大気圧接合技術
3. 学会等名 (社)エレクトロニクス実装学会 実装フェスタ関西(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. H. Yang, C. Y. Yang, C. R. Kao, A. Shigetou
2. 発表標題 A Single Process for Homogeneous and Heterogeneous Bonding in Flexible Electronics Ethanol-Assisted Vacuum Ultraviolet (E-VUV) Irradiation Process
3. 学会等名 2019 International Conference on Electronics Packaging (ICEP) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 MINARI, Takeo, LIU, Xu-Ying, SUN, Qingqing, LI, Wanli, SHIGETOU, Akitsu, 金原 正幸
2. 発表標題 Printing of Flexible Electronics for Wearable Applications
3. 学会等名 2019 IEEE/JIEP International Conference on Electronics Packaging (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 重藤 暁津, 楊 弘偉, 高 振宏
2. 発表標題 低温大気圧有機無機ハイブリッド接合に必要な極薄架橋構造の設計
3. 学会等名 第25回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 重藤 暁津, 楊弘偉, Robert Kao
2. 発表標題 高信頼性低温大気圧有機無機ハイブリッド接合
3. 学会等名 マイクロエレクトロニクスシンポジウム (MES)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 SHIGETOU, Akitsu, Hongwei Yang, Robert Kao
2. 発表標題 Low Temperature and Non-Vacuum Surface Modification for Robust Hybrid Bonding
3. 学会等名 Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 重藤暁津
2. 発表標題 機能性材料創製のための低温大気圧接合技術 - 要素技術と将来展望 -
3. 学会等名 日本学術振興会153委員会 プラズマ材料科学スクール (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akitsu Shigeotu
2. 発表標題 Hybrid Bonding Among Polymers, Metals and Semiconductors for Lightweight and Smart Structural Materials
3. 学会等名 Materials Science Conference & SMART Center Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 重藤暁津
2. 発表標題 新しい機能性材料創製の ” 道具 ” としての ハイブリッド接合
3. 学会等名 東レ 専門自主講座 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮崎英樹ら計9名, 重藤暁津は最終著者
2. 発表標題 メタ表面量子井戸赤外線検出器
3. 学会等名 2018年第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 SHIGETOU Akitsu
2. 発表標題 Hybrid Bonding Without Vacuum and High Temperature for Cross-Cutting Applications
3. 学会等名 IEEE EPS/JIEP International Conference on Electronics Packaging (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 重藤暁津
2. 発表標題 機能複合化手法としての低温大気圧異種材料接合
3. 学会等名 スマートプロセス学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 HAINEY JR., Mel Forrest, MANO, Takaaki, KASAYA, Takeshi, 神馬 洋司, 宮崎 博司, OCHIAI, Tetsuyuki, OOSATO, Hirotaka, 渡邊 一弘, SUGIMOTO, Yoshimasa, KAWAZU, Takuya, ARAI, Yukinaga, SHIGETOU, Akitsu, MIYAZAKI, Hideki
2. 発表標題 Metasurface Quantum Well Photodetectors with Broadened Photoresponse Using Patchwork of Cavities within a Subwavelength Period
3. 学会等名 Metasurface Quantum Well Photodetectors with Broadened Photoresponse Using Patchwork of Cavities within a Subwavelength Period ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 HAINEY JR., Mel Forrest, MANO, Takaaki, KASAYA, Takeshi, OCHIAI, Tetsuyuki, OOSATO, Hirotaka, 渡邊 一弘, SUGIMOTO, Yoshimasa, KAWAZU, Takuya, ARAI, Yukinaga, SHIGETOU, Akitsu, MIYAZAKI, Hideki
2. 発表標題 Dual-band Metasurface Quantum Well Infrared Photodetectors for NO2 Sensing
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 SHIGETOU Akitsu
2. 発表標題 Hybrid Bonding in Ambient Atmosphere for Cross-Cutting Applications
3. 学会等名 2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 HAINEY JR., Mel Forrest, MANO, Takaaki, KASAYA, Takeshi, OOSATO, Hirotaka, 渡邊 一弘, SUGIMOTO, Yoshimasa, KAWAZU, Takuya, ARAI, Yukinaga, SHIGETOU, Akitsu, OCHIAI, Tetsuyuki, 神馬 洋司, 宮崎 博司, MIYAZAKI, Hideki
2. 発表標題 Morphology considerations for optimizing metasurface quantum well photodetector performance
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 重藤 暁津, Tilo H Yang, C Robert Kao
2. 発表標題 軽量かつスマートな構造材料のための 高信頼性低温大気圧異材接合技術
3. 学会等名 第124回マイクロ接合研究委員会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 重藤暁津	4. 発行年 2020年
2. 出版社 溶接学会	5. 総ページ数 -
3. 書名 溶接接合教室 - 特論編 - 「異種材料の低温大気圧接合」	

1. 著者名 重藤 暁津	4. 発行年 2018年
2. 出版社 サイエンス&テクノロジー	5. 総ページ数 16
3. 書名 真空紫外光照射と極薄架橋形成による有機・無機材料の低温大気圧混載接合の要素技術 (第4章 親水性表面の応用展開・活用事例) . 超親水・親油性表面の技術	

1. 著者名 重藤暁津	4. 発行年 2018年
2. 出版社 サイエンス&テクノロジー	5. 総ページ数 15
3. 書名 超親水・親油性表面の技術 (第4章)	

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 積層体の製造方法、積層体、及び、暖房便座装置	発明者 重藤暁津, 楊弘偉	権利者 国立研究開発法人物質・材料研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019/19757	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 METHOD FOR MANUFACTURING LAYERED ARTICLE, LAYERED ARTICLE, AND HEATED TOILET SEAT DEVICE	発明者 SHIGETOU Aki tsu, YANG Hong-Wei	権利者 国立研究開発法人 人物資・材料研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、EP19804003.2	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 METHOD FOR MANUFACTURING LAYERED ARTICLE, LAYERED ARTICLE, AND HEATED TOILET SEAT DEVICE (原文は中国語)	発明者 重藤暁津、楊弘偉	権利者 国立研究開発法人 人物資・材料研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、201980031521.4	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	水野 潤  (MIZUNO Jun)  (60386737)	早稲田大学・ナノ・ライフ創新研究機構・上級研究員(研究院教授)    (32689)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高 振宏  (KAO Robert)		国立台湾大学教授 連携大学院

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
台湾	国立台湾大学		