

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249099

研究課題名(和文) 異種金属の接合強度発現機構の解明と新接合プロセスへの展開

研究課題名(英文) Investigation of interfacial strength evolution in dissimilar metal bonding and its application to a new bonding process

研究代表者

小関 敏彦 (Koseki, Toshihiko)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：70361532

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、構造体のマルチマテリアル化を可能にするために、異種金属の比較的低温での接合強度の発現機構を解明し、新たな異種金属接合の指針を導出することを目的としている。鋼と鋼、鋼とニッケルの中温での圧接、その後の等温保持の実験から、接合界面強度の発現は二段階であり、第一段階では圧接の接触面積はそのまま接合強度が増し、第二段階では接触面積が増すことによって接合強度が増すことがわかった。界面のひずみの解析、分子動力学を用いた接合のシミュレーションから、第一段階では界面近傍の原子の再配列、ひずみの低減により界面強度の上昇が起こることが示唆され、圧接後の等温保持の重要性が示された。

研究成果の概要(英文)：This study aims at clarifying the bonding mechanism of dissimilar metals at low temperatures and designing a new joining process of dissimilar metals that enables multi-material structures. For the purpose, steel-to-steel and steel-to-nickel combinations were warm-compressed and isothermally held, and the microstructure of the bonding interface and its strength were investigated. It was found that the evolution of the interfacial strength consisted of two stages; strength increase without increase in contact area of the interface (stage I) and the following strength increase with increasing the contact area (stage II). Analysis of strain distribution at the bonding interface and molecular dynamic simulation of the bonding process reveals that the rearrangement of atoms and decrease in compressed strain proceed in the stage I, which increases the interfacial strength without increase in contact area. The importance of isothermal holding after the compressive bonding is indicated.

研究分野：金属工学、接合工学

キーワード：異種金属 接合 固相接合 界面 界面強度 分子動力学

1. 研究開始当初の背景

異種金属の接合は、構造体やデバイスを多様な材料から構成して高性能化する「マルチ材料化」を進める上で極めて重要である。例えば自動車では、鉄鋼材料に加え各種の軽量金属や高强度材料を組み合わせ、更なる軽量化と環境対応、安全性向上を図ろうとしているが、異種金属の接合がその実現の鍵である。また、異なる金属を複層化する高性能の金属基複合材料の創製においても不可欠である。しかし、これまで異種金属の接合は経験的・試行錯誤的な面が強く、接合界面の形成機構や強度発現機構を本質的に解明して、それに基づいて開発されることは極めて限られ、マルチ材料化のネックであった。

従来、異種金属の接合としては、金属間をアークやレーザーで溶融して接合する「溶接」、金属間に溶融金属をインサートして接合する「ろう付け」、金属同士を高温の拡散や圧接によって接合する「拡散接合」「熱間圧接」などがあるが、金属間の融点差やろう材の融点や濡れ性などによる適用の制約、溶融や相互拡散による元素の混合、脆性化合物の生成などによる接合部の強度の低下や低信頼性など、多くの異種金属の組み合わせで課題があった。また、高温・長時間の接合プロセスは構造体やデバイスの製造工程での適用も難しい。したがって、より低温で短時間の汎用的な異種金属の接合プロセスが強く求められ、それによって新しいマルチ材料の構造体やデバイスが可能になるが、そもそも異種金属間の接合の界面形成や強度発現の機構、それらの影響因子の解明が不十分のため、その指針も明らかになっていない。

一方、申請者らは、高真空下でイオンエッチングによって表面を清浄化した鋼と Ni の表面活性化接合を行い、その後の熱処理による界面強度の発現を検討した結果、図 1 に示すように、550 という鋼や Ni の融点から見るとかなりの低温でも界面強度が発現すること、しかもその発現過程は 2 段階で、特に初期の強度上昇が大きく、数分という短時間で全体の界面強度の主要な割合まで上昇することを見出してきた。鋼と Ni を拡散接合

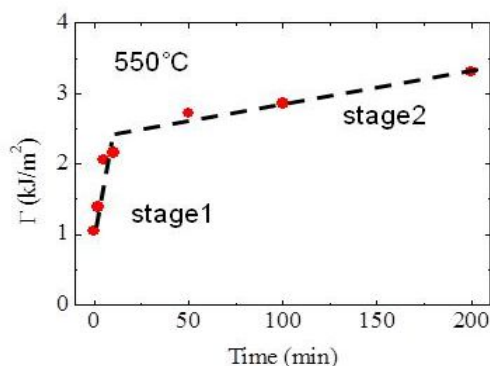


図 1 : 鋼-Ni の接合界面の熱処理中の強度発現

する場合は 800 ~ 1000 で数時間を要するのが通常であり、温度・時間から考えて図 1 の強度上昇は拡散によるものではない。この違いが何に起因するか、拡散の期待できない低温での界面形成機構や、そこでの短時間での強度発現の機構、これらを明らかにすることは、比較的低温・短時間での汎用性の高い新たな異種金属の接合プロセスの開発を進める上で極めて有益である。

2. 研究の目的

本研究は、移動体などの構造体のマルチ材料化の進展に不可欠な異種金属の接合に関し、その技術基盤となる異種金属間の界面強度の発現機構を解明し、比較的低温・短時間で可能な異種金属の接合技術の指針を導出することを目的とする。従来、異なる金属の接合はろう付けや高温での拡散接合が主であるが、前者は適用範囲が狭い上に接合強度が低く、後者は高温・長時間の非効率に加え界面の相互拡散や反応相生成による脆化や低信頼性が課題であった。

本研究では、異種金属の表面活性化接合の検討で見出された比較的低温・短時間の界面形成と強度上昇を掘り下げ、その機構と支配因子の解明を通して、より効率的で汎用の異種金属接合プロセスの指針と条件を導出し、構造体のマルチ材料化や新たな金属基複合材料の創製に寄与する。

3. 研究の方法

試験に用いた金属は極低炭素の IF 鋼 (Fe-0.001C-0.008Si-0.20Mn) および純 Ni である。直径 8mm、高さ 6mm の円柱試験片を作成し、鋼-鋼または鋼-Ni で重ねたものを、575 ~ 650 に加熱し、2.5% ~ 10% 圧接した後、1 ~ 150 秒保持後冷却した。接合面の粗さは鏡面研磨とした。接合試験片は、引張り試験により接合界面強度を測定するとともに、接合界面の組織観察を SEM および TEM、引張り試験後の破断面の観察を SEM で行った。また接合界面付近のひずみ分布を SEM-EBSD で測定した。接合界面の接合面積は破断面上で測定するとともに、4 端子抵抗測定により求めた。

また、接合プロセス後の原子の再配列やひずみの回復挙動を検討するために、分子動力学法 (MD) を用いた Fe-Fe 接合シミュレーションを行った。Finis-Sinclair potential を用い、原子数 60000 ~ 65000 で、図 2 に示すような形状でシミュレーションを行った。

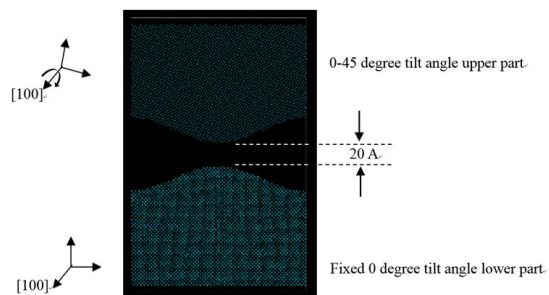


図 2 : MD による Fe-Fe 接合シミュレーション

4. 研究成果

図 3 に鋼-鋼の場合の接合温度、接合後の保持時間と接合強度の関係を示す。圧縮は5%である。

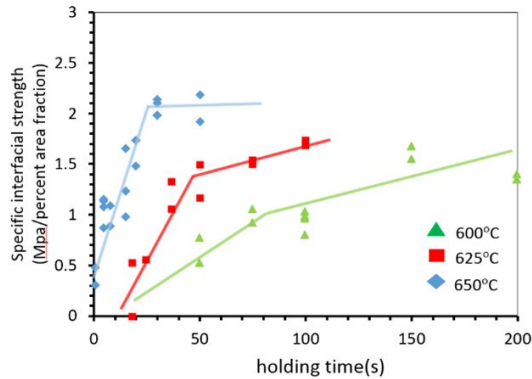


図 3: 鋼-鋼の場合の接合温度、接合後の保持時間と接合強度の関係

接合強度は圧接後の等温保持時間とともに上昇し、その上昇は高温ほど短時間である。強度上昇は2段階に分けられ、第一段階は比較的急上昇であり、第二段階は緩やかである。図 4 に接合面積と接合界面の関係を示すが、第一段階では接合界面の面積の変化はほとんど無く、圧接で接触した面の強度上昇が全体の接合強度上昇を支配していることが分かる。

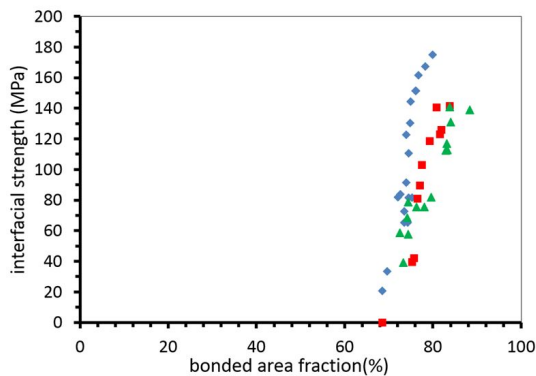


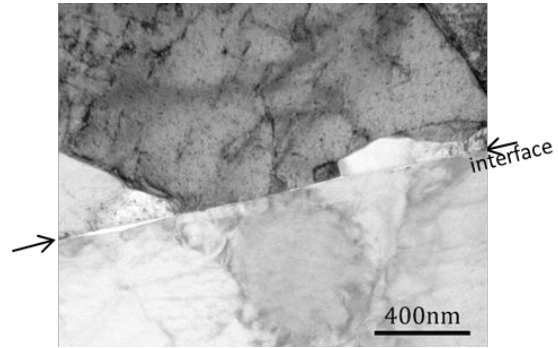
図 4: 接合面積と接合界面の関係

一方、引張試験後の破断面ならびに界面の組織観察、4端子法に抵抗測定から、第二段階では等温保持時間とともに接合面積は増加しており、一般に焼結体のボイドの収縮と同様の機構で等温保持中に接合面積が増加すると考えられた。

第一段階および第二段階の接合界面の TEM 写真を図 5 に示すが、第一段階ではシャープであった未接合の空隙のエッジが、第二段階では丸くなっており、時間とともにエッジ部が拡散により収縮したことが示唆される。

次に初期圧縮を変えた場合の等温保持中の接合界面強度の発現を図 6 に示す。接合の圧下率を変えても2段階の強度上昇は変わらず、圧下率の小さい方が、相対的に強度上昇は速く、また最終到達界面強度が低い傾向が得られた。なぜ強度発現が早まるかは興味深く、更に検討が必要である。

(a) 第一段階



(b) 第二段階

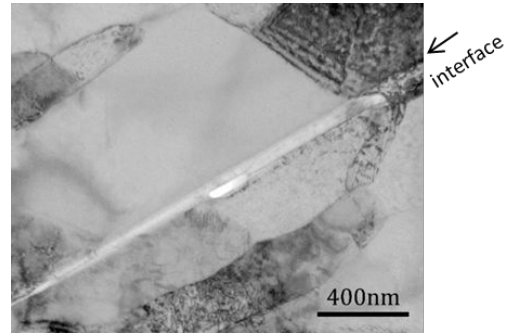


図 5: (a) 第一段階および(b)第二段階の接合界面の TEM 写真

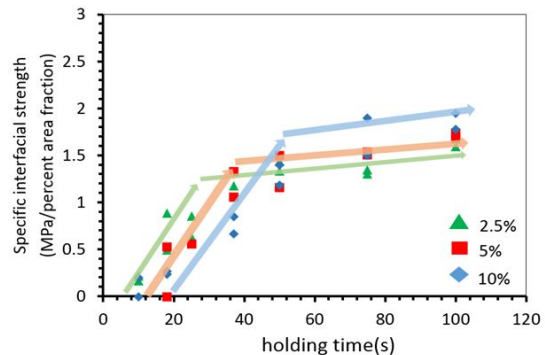
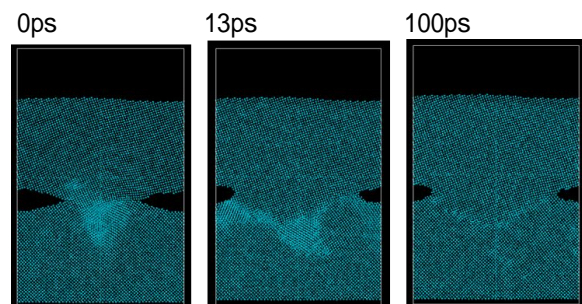


図 6: 初期圧縮を変えた場合の等温保持中の接合界面強度の発現

図 7 に MD シミュレーション結果を示す。図中、色が明るくなっているのは、圧下によって原子の配列が乱れ、ひずんだ領域であるが、時間とともに、原子配列の乱れは、回復、原子の再配列によって減少していくことが示される。



200ps 300ps 400ps

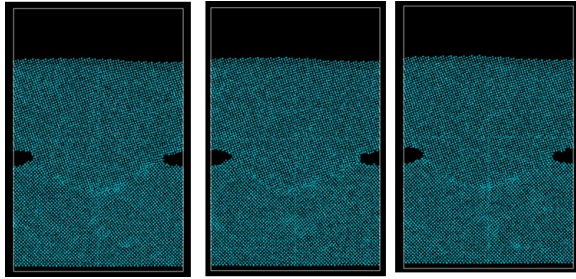


図 8: Fe-Fe 接合 MD シミュレーション結果。
ひずみに及ぼす等温保持時間の影響

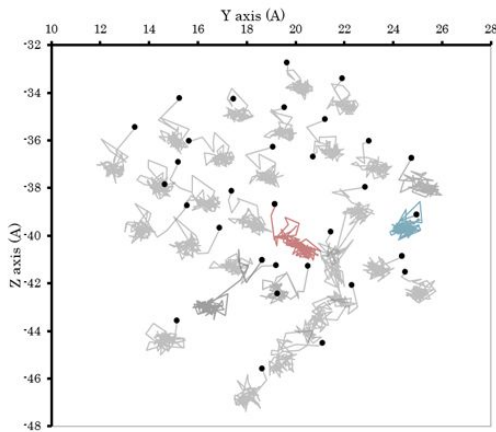


図 9: Fe-Fe 接合 MD シミュレーション結果。
等温保持中の原子の再配列挙動

図 9 に等温保持初期(13-100ps)の原子の再配列挙動を示すが、非常に活発に再配列し、ひずみが低減するとともに、接合界面も整合に向かうことが示唆される。

以上をまとめると、比較的低温で圧接された接合界面の強度はその後の等温保持過程で発現すること、その発現は 2 段階であり、第一段階では圧接の接触面積はそのまま接合強度が増し、第二段階では接触面積が増すことによって接合強度が増すことがわかった。界面のひずみの解析、分子動力学を用いた接合のシミュレーションから、第一段階では界面近傍の原子の再配列、ひずみの低減により界面強度の上昇が起こることが示唆され、比較的低温での接合の実現と強度の確保には、圧接後の等温保持が重要であることがプロセスの指針として示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

K. Pongmorakot, S. Nambu, Y. Shibuta and T. Koseki, "Investigation on the mechanism of steel/steel solid-state bonding at low temperatures", Sci. Technol. Weld Joining, 22 (2017), pp. 257-263 査読有

〔学会発表〕(計 6 件)

ポンゴモラコットギッティパン, 南部将一, 小関敏彦, 「低温での鋼/ニッケル固相接合の界面強度発現過程に及ぼす接合圧下率の影響」, 溶接学会平成 29 年度春季全国大会 (2017) 一橋記念講堂 (東京都千代田区)

K. Pongmorakot, S. Nambu, Y. Shibuta and T. Koseki, "Atomic behavior and mechanism of metal/metal solid state bonding at low temperatures", 10th Int'l Conf. on Trends in Welding Research, 2016, Hitotsubashi Hall, Tokyo

K. Pongmorakot, S. Nambu and T. Koseki, "Interfacial strength evolution of solid state bonding between dissimilar metals at low temperatures", 溶接学会平成 28 年度秋季全国大会 (2016) ホテル天坊 (群馬県渋川市)

K. Pongmorakot, S. Nambu, Y. Shibuta and T. Koseki, "Interfacial strength evolution mechanism in steel-to-steel solid state bonding at low temperature", 11th Int'l Seminar Numerical Analysis of Weldability, 2015, Graz, Austria

K. Pongmorakot, S. Nambu, Y. Shibuta and T. Koseki, "Atomic behavior at the bonding interface during low temperature steel-to-steel solid state bonding", 溶接学会平成 27 年度秋季全国大会 (2015) 北海道大学 (北海道札幌市)

K. Pongmorakot, S. Nambu, J. Inoue and T. Koseki, "Interfacial strength evolution in low temperature steel-to-steel solid-state bonding", 溶接学会平成 27 年度春季全国大会 (2015) 一橋記念講堂 (東京都千代田区)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小関 敏彦 (KOSEKI, Toshihiko)
東京大学大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 70361532

(3) 連携研究者

井上 純哉 (INOUE, Junya)
東京大学大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 70312973

南部 将一 (NAMBU, Shoichi)
東京大学大学院工学系研究科・講師
研究者番号: 00529654

小島 真由美 (OJIMA Mayumi)
東京大学大学院工学系研究科・助教
研究者番号：80569799