

令和元年6月20日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14822

研究課題名(和文)自動車のマルチマテリアル化に向けた異材接合部の耐衝撃性支配因子の解明

研究課題名(英文)Elucidation of impact toughness controlling factor of dissimilar joints for multi-materials design of automobile

研究代表者

高嶋 康人(TAKASHIMA, Yasuhito)

大阪大学・接合科学研究所・助教

研究者番号：50397692

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：衝撃負荷を受けた異種鋼板継手の接合界面付近の塑性エネルギー分布や温度場を3次元動的モデルで解析した。その結果、塑性仕事による発熱と温度上昇が接合界面付近で非対称に分布することを把握した。この解析の妥当性を明らかにするため、高速撮影可能な赤外線カメラを導入して高速変形中の異材接合部の温度上昇特性を計測し、数値解析モデルが実現象をよく再現していることを確認した。また、強度の異なる鋼を接合した継手のシャルピー衝撃特性に及ぼす強度差の影響をワイブル応力を媒体として評価する手法を構築し、その有効性を実験で検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車のマルチマテリアル化を進めるうえで異材接合部には十分な強度とともに耐衝撃性が求められることになるが、この研究によって得られた成果により、異材継手を構成する材料の強度差に応じて継手の破壊抵抗を評価可能な手法構築に至った。この手法を用いることで、強度の組合せに応じて継手の破壊抵抗を予測することが可能となり、強度と軽量を兼ね備えるバランスの良い異材の組み合わせを導く指針につながるものと見込んでいく。

研究成果の概要(英文)：In this work, dynamic temperature fields and strain energy distribution in a dissimilar steel joint was numerically analyzed by means of three-dimensional explicit finite element method. The temperature in the soft steel particularly increased during the dynamic loading. A high-speed infrared camera was used to measure the temperature field near the bonded interface. The numerically calculated temperature fields showed reasonable agreement with that measured. Furthermore, the influence of strength mismatch in dissimilar joints on the Charpy absorbed energy was evaluated on the basis of the Weibull stress criterion for brittle fracture. Charpy test results for a clad joint of dissimilar steels were characterized by the strength mismatch ratio.

研究分野：破壊力学・衝撃工学

キーワード：異材継手 動的負荷 断熱変形 シャルピー衝撃特性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自動車や鉄道車両などの輸送機器では、近年、車体の軽量化のために多様な強度の材料・部材を組み合わせた合理的な設計の活用が期待されている。車体は衝突事故などによって衝撃負荷が加わる場合があり、慣性などの衝撃現象の理解を深めることが重要とされている。つまり、自動車では衝突事故などに備えて部材の耐衝撃性が重要であり、部材のマルチマテリアル化を進めるうえで接合部には十分な強度とともに耐衝撃性が求められることになる。この接合部では、異材接合ゆえの力学的特性の不均一(たとえば強度の違い)が静的な状態での破壊靱性に影響することが知られており(文献 )、衝撃を受けた動的な状態でも影響を及ぼすことが想像に難くなかった。しかし、その影響度を定量的に予測することは実現できておらず、そのために継手衝撃特性の支配因子を把握するには至っていない。

金属材料では一般に変形に対する抵抗がひずみ速度に依存することが知られており、静的な状態での異材の強度差が衝撃負荷を受けた際にもそのまま存在するとは限らない。力学的特性が不均一な異材接合部が衝撃負荷を受けたときの変形・破壊挙動について、これまであまり観察されておらず、破壊に至るまでの変形が同種材を接合した継手の場合とどのような違いがあるかは把握されていない。衝撃時の破壊に対して、異材接合部に生じる不均一な変形挙動がどのように影響するかは未解明であり、接合部の耐衝撃性について観察事実や物理モデルに基づいて科学的にアプローチする研究が必要であった。

### 2. 研究の目的

このような背景のもとで、本研究は、異材継手として強度の異なる異種鋼板を接合した継手を対象として、その継手の耐衝撃性支配因子の解明に向けて、衝撃負荷を受けて破壊に至るまでの変形・衝撃応答を再現できる数値シミュレーション手法を確立することを目的とした。また、高速変形時の物理現象と関連づけられる温度場を計測することと数値シミュレーションを組み合わせ、接合界面付近の変形挙動や破壊に至るまでの応力・ひずみ場の理解を深めることを目指した。さらに、計測した温度場と数値シミュレーションの結果を比較してシミュレーション手法の妥当性を示し、このシミュレーション手法を用いて異材の強度差が継手の衝撃特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

これらの目的を達成することにより、接合部の耐衝撃性すなわち破壊に対する抵抗を異材の強度差をふまえて評価できるような破壊モデルを構築し、異材継手の衝撃特性の評価法に展開することに挑んだ。

### 3. 研究の方法

これまでに研究代表者が構築した衝撃応答に関する数値解析モデル(文献 )を用いて、強度の異なる鋼板を組み合わせた継手試験片に対して衝撃負荷が作用した場合の変形挙動を解析し、その妥当性や有効性の確認に取り組んだ。このモデル(文献 )は、物体の衝突時の接触荷重を Hertz の接触理論に基づいて解き、そのうえで部材に発生する応力を有限要素法(FEM)による解析で運動方程式を扱うことにより、部材が衝撃負荷を受けた際に部材内で生じる応力の衝撃応答(慣性による振動と減衰)を説明できるものである。本研究では、この手法を異材接合継手の衝撃特性の解明のために適用した。

鉄鋼材料に塑性変形(元に戻らない変形)が生じるとそのエネルギーは主として熱に変換される(文献 )が、高速変形時は熱伝導よりも先に変形が進むため熱エネルギーが拡散できず温度が上昇する。そこで、異材継手の衝撃変形を高速な赤外線カメラで撮影し、接合部に生じる塑性変形に起因した温度上昇が不均一になっているかを調べた。具体的には、強度差のある異種鋼板をクラッド接合した継手から作製した試験片の動的3点曲げ試験(負荷速度 100 mm/s)を実施し、図 1 に示すようにして試験片表面の温度場をフレームレート 200 Hz の高速赤外線カメラで撮影して、サーモグラフィにより変形中に生じる温度変化を調べた。さらに、これに対して塑性仕事による発熱と高速変形中の熱伝導を考慮した熱-応力連成 FEM 解析を先に示した数値解析モデルと組み合わせて実施し、この解析でクラッド接合継手試験片の接合界面付近の塑性エネルギー分布と温度場を求めた。この解析では、塑性変形エネルギーの 90% が熱に変換されるという報告(文献 )に基づいてエネルギーを熱に換算し、鉄鋼材料の熱伝導物性値を反映して温度場を計算した。数値解析結果と計測結果を比較して、異材継手の衝撃応答に対する数値シミュレ

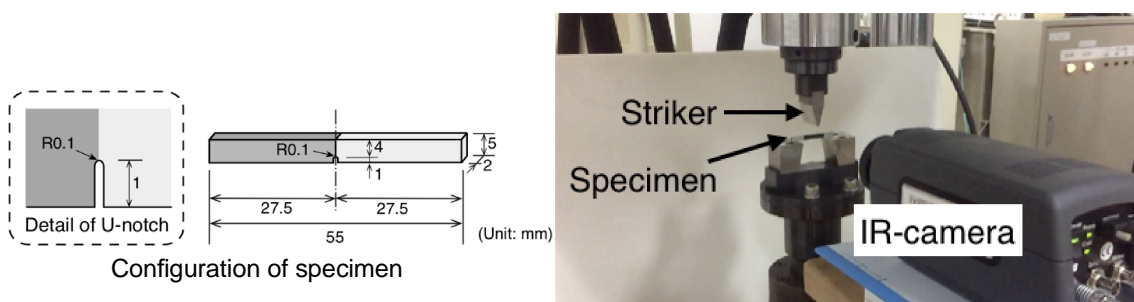


図 1 異材継手試験片を用いた動的 3 点曲げ試験での温度変化の計測

ーション手法の妥当性を確認し、継手試験片が破壊に至るまでの変形挙動や温度場、応力場を調べて、シャルピー衝撃特性に及ぼす異材の強度差の影響を調査した。

#### 4. 研究成果

強度の異なる鋼をクラッド接合した継手から作製した試験片を用いて動的 3 点曲げ試験中に試験片表面に生じる温度上昇を赤外線カメラで計測し、それによって得られた温度場を図 2 に示す。強度の低い側で温度上昇が顕著になっており、高速変形中の温度は接合部をはさんで非対称に分布していることがわかった。これは、強度の低い側では塑性変形が積極的に進行するため、熱に変換されるエネルギーが大きくなったことが原因であると考えた。また、強度差があることで変形が低強度側に集中したことで同種材の継手に比べてひずみ速度が大きくなり、その結果として温度は上昇しやすいことが見込まれた。このような不均一な温度上昇を計測した報告はこれまでなく、異材継手特有の現象として新しい知見が得られた。

これに対して、物体の衝突を考慮した数値解析モデル(文献 )と熱 - 応力連成 FEM 解析を組み合わせて異材継手の温度場を解析し、それによって得られた結果を図 2 に示す温度上昇分布を重ねて比較した。数値解析で得られた温度上昇分布は実験計測結果と同様に強度の低い側で温度上昇が顕著になっており、その値は計測結果とよく対応することが明らかとなった。すなわち、衝撃負荷を受けた異材接合継手の変形挙動、温度変化を再現できる数値シミュレーション手法であることが示され、手法の妥当性が確認できた。赤外線カメラによる計測では試験片表面の温度場しか把握できないが、3 次元モデル

による数値シミュレーションでは内部の温度上昇やひずみ場、応力場を確認することができた。

このように強度差のある異材を接合した継手の衝撃応答を再現できた数値シミュレーション手法を活用し、継手が衝撃負荷を受けて破壊に至るまでの挙動を解析して、衝撃特性と耐破壊性能について検討した。一般に鋼のぜい性破壊は応力支配型の破壊現象として理解されており、ワイルド応力(文献 )を指標とした破壊基準による評価が有効と考えられている。これを異材接合継手のシャルピー衝撃特性評価に対して適用し、本研究で構築した数値シミュレーション手法で求めた衝撃時の応力場に対してワイルド応力を計算し、破壊が生じるまでのひずみエネルギーをシャルピー吸収エネルギーとして求めることで、衝撃特性に及ぼす異材の強度差の影響について検討した。シャルピー吸収エネルギーに及ぼす異材の強度差の影響を数値シミュレーションで求めた結果を図 3 に示す。図中の点線は強度差のない場合を示しており、実線は強度差の影響をパラメトリックに解析した結果をふまえて関数化して表したものである。強度差によってシャルピー吸収エネルギーが変化しており、影響が無視できないことがわかった。また、この解析結果の妥当性を確かめるため、強度差のある異材を接合した継手で求めたシャルピー吸収エネルギーと母材のシャルピー吸収エネルギーの対応関係を調べたところ、図 3 に示すように解析結果と概ね対応する関係であることがわかり、強度差の影響を適切に評価できることが示された。

この研究によって得られた成果により、異材継手を構成する材料の強度差に応じて継手の破壊抵抗を評価可能な手法構築に至った。この手法を用いることで、強度の組合せに応じて継手の破壊抵抗を予測することが可能となり、強

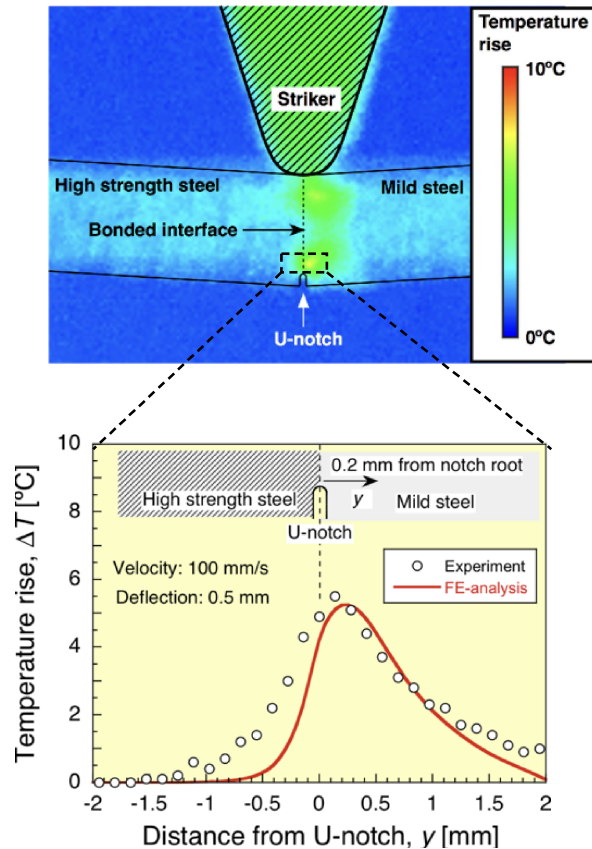


図 2 高速変形中の異材継手試験片に生じる温度上昇分布

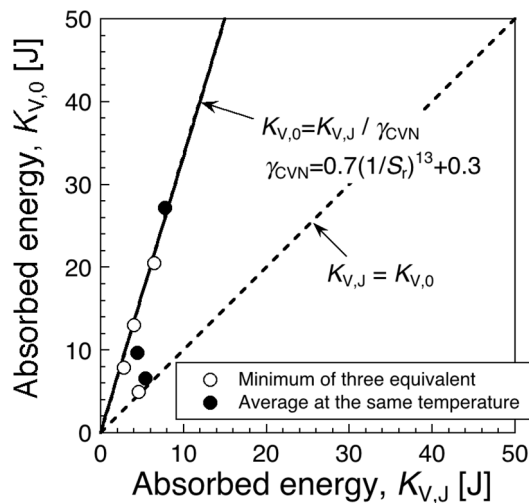


図 3 継手を構成する異材の強度差がシャルピー衝撃特性に及ぼす影響

度と軽量性を兼ね備えるバランスの良い異材の組み合わせを導く指針につながるものと見込んでいる。これまでの成果に関する論文は溶接・接合に関する国際的な学術雑誌 *Welding in the World* に掲載可となった。

#### < 引用文献 >

- Ruggieri, C., 南二三吉, 豊田政男. (1993). Effect of strength mismatch on crack tip stress fields of HAZ-notched joints subjected to bending and tension. *日本造船学会論文集*, (174), 543-549. [https://doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.1993.174\\_543](https://doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.1993.174_543)
- Takashima, Y., Handa, T., & Minami, F. (2017). Three-dimensional dynamic explicit finite element analysis of Charpy impact test. *Materials Science Forum*, 879, 1905-1910. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.1905>
- Taylor, G. I., & Quinney, H. (1934). The latent energy remaining in a metal after cold working. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 143(A849), 307-326. <https://doi.org/10.1098/rspa.1934.0004>
- Beremin, F. M., (1983). A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 14(11), 2277-2287. <https://doi.org/10.1007/BF02663302>

#### 5 . 主な発表論文等

##### [ 雑誌論文 ] ( 計 2 件 )

- Takashima, Y., Ito, Y., Lu, F., & Minami, F. (2019). Fracture toughness evaluation for dissimilar steel joints by Charpy impact test. *Welding in the World*, in press. 査読有  
DOI: 10.1007/s40194-019-00752-x
- Takashima, Y., & Minami, F. (2018). Numerical analysis of temperature rise during dynamic loading for dissimilar steel joint specimen. *Materials Science Forum*, 941, 280-286. 査読有  
DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.280

##### [ 学会発表 ] ( 計 4 件 )

- Takashima, Y., & Minami, F. (2019). Explicit finite element analysis of dynamic response of dissimilar steel joint specimen. Presented at the IIW 2019 intermediate meeting.
- Takashima, Y., Ito, Y., Lu, F., & Minami, F. (2018). Fracture toughness evaluation for dissimilar steel joints by Charpy impact test. Presented at the IIW 2018 annual assembly.
- Zhao, H., Cui, H., Lu, F., Takashima, Y., & Minami, F. (2018). Numerical investigation on crack propagation behavior along interfaces in dissimilar steels welded joint. Presented at the IIW 2018 annual assembly.
- Takashima, Y., & Minami, F. (2018). Numerical analysis of temperature rise during dynamic loading for dissimilar steel joint specimen. Presented at THERMEC'2018: International conference on processing & manufacturing of advanced materials.

##### [ その他 ]

###### 解説記事

- 高嶋康人, 南二三吉. (2018). 接合部衝撃特性の動的シミュレーション. *スマートプロセス学会誌*, 7(1), 21-27.  
DOI: 10.7791/jspmee.7.21

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。