

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月30日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560148

研究課題名（和文） 分解可能なインパクトリベット締結法の開発研究

研究課題名（英文） Development of impact riveting method
considering design for disassembly

研究代表者

海津 浩一（KAIZU KOICHI）

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50177317

研究成果の概要（和文）：薄板に対して衝撃荷重や準静的な荷重のどちらを用いてもインパクトリベット締結法により継手の作製が可能であること、特に衝撃荷重を用いて作製した継手は面外変形が小さく、高い継手強度を持つことなどを明らかにした。また SPH 法によるシミュレーションにより、衝撃荷重を用いる場合は塑性変形の局所化による温度上昇が継手の強度や変形に影響している可能性があることを明らかにした。さらにリベット形状により分解荷重を低下させ、容易に分解ができることも明らかにした。

研究成果の概要（英文）： In an impact riveting method, thin sheets were able to be joined by the impulsive load and the quasi-static load. Deformation of sheets joined by the impulsive load was smaller than that of the sheets joined by other methods. The joint made by the impulsive load had high strength. The numerical results obtained by the SPH method showed that the temperature rise by the localization of the plastic deformation might influence strength and deformation of the joint. The loads for disassembly were decreased by the shape of the rivet and the disassembly of the joint became easy.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：材料力学，衝撃工学

科研費の分科・細目：機械工学 設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機械要素，締結，分解，リサイクル，継手

1. 研究開始当初の背景

リベットは、永久締結に用いられるため、分解が可能なボルト締結に押され、機械や構造物などの金属部品の組立、溶接やボルトにより締結が困難な箇所の接合に限定されていた。しかしながら、近年のコストダウン化、省力化の要望とともに、リベット締結は加工が容易で締結強度が高いことから再び注目を集めている。特に、セルフピアシングリベットは自動車業界において急速に用いられるようになってきている。セルフピアシング

リベットの特徴は、穴あけ加工が不要なこと、接合速度が速いこと、溶接が難しい材料や異種材料の締結が可能なことなどがあげられる。しかし、あまり高い締結強度が得られないことや締結後の板の面外変形が大きいことが欠点として考えられる。また、通常のリベット締結法では、板を損傷させずに継手を分解することは困難であり、板を再利用するためには矯正等が不可欠である。研究代表者は、従来から、高速塑性加工の実用化を目指し、高速打抜き加工の研究を行ってきた。高

速打抜き加工の特徴は、(1) 打ち抜かれた薄板の穴の周囲の変形が少ない(加工の影響が局所的なので製品精度がよい)、(2) 打抜き速度が速いほど、打ち抜いた板の穴の切り口面に凸凹した破断面の割合が減り、平滑なせん断面の割合が増える、(3) 加工時間が非常に短い、などがあげられる。研究代表者は、その衝撃現象特有の特徴をリベット締結に活かすことを考え、(1) 高速打抜き加工の特性を活かして、セルフピアシングリベットと同様に板の穴あけ加工を必要としない、(2) 通常のかしめ加工によるリベット締結と同等以上の強度を持つ、(3) 締結後の板の面外変形が小さい、という優れた特徴を持つインパクトリベット締結法を開発した。この締結法は高速で発射した錘の打撃力を利用してリベット軸を薄板へ打ち込み、穴あけと板の締結を同時に行うことができ、しかも継手の材料をリサイクルしやすいように分解ができる新たなリベット締結法である。しかしながら、インパクトリベットの实用化のために、最適なインパクトリベットの打撃方法や分解法の確立などの解決しなければならない問題があった。

2. 研究の目的

瞬間的な締結が可能で、締結される薄板の変形が少なく、高強度な継手を得られ、かつ分解を可能にしたインパクトリベット締結法を改善し、实用化に近づけることを本研究の目的とした。そのために、以下の課題を検討することにした。

(1) インパクトリベット締結法における打撃方法に関する検討

インパクトリベットを薄板に打ち込む打撃法として、圧縮空気を用いた大型の衝撃試験機を用いてきたが、錘が小さいため、板の打抜きと締結に必要なエネルギーを得るために 110m/s 程度まで錘を加速しなければならなかった。そのために大掛かりな錘の加速設備が必要となり、实用化の障害となっていた。实用化を進めるために、コンパクトで使いやすい設備で締結できることが必要のため、衝撃荷重を用いない準静的なリベットの打込みにより締結が可能かを検討する。

(2) インパクトリベット締結法により作製された継手の分解に関する検討

インパクトリベット締結法の大きな特徴は、通常のリベットでは困難な分解ができることである。しかしながら、現状では分解荷重が高いことから容易には分解できない。そのため、リベット形状を工夫することにより、高い締結強度を維持したままで分解荷重を低下させられるかを検討する。

(3) インパクトリベット締結法により作製された継手の締結強度が向上するメカニズムの検討

インパクトリベット締結法により作製された継手の強度は代表的なリベット締結法であるかしめ加工により作製した継手の強度と同等以上であることは既に明らかになっている。インパクトリベット締結法により高い締結強度の継手を得られるメカニズムについてシミュレーションにより検討する。

3. 研究の方法

(1) インパクトリベット締結法における打撃方法に関する検討方法

衝撃荷重と準静的荷重を用いた締結法及びかしめ加工の3種類の締結法を用いて、厚さ 0.8mm の SPCC-SD の帯板により継手を作製した。図1は衝撃荷重を用いた締結法の概要図を示している。図2にリベットとリベットホルダーの形状と寸法を示している。リベットホルダーは継手の分解を可能にするために提案したものである。リベットおよびリベットホルダーには SS400 を用いた。以下の手順で図3の継手を作製した。

① ダイスにリベットホルダーおよび2枚の薄板を設置する。さらにリベット頭部を打撃するために圧縮空気を用いた錘を加速する円管の出口にリベットを軸先端が板の上面に接する状態で設置する。

② 図1に示す円管上部に錘を挿入し、ピンで落下しないように支える。

③ 圧縮空気を蓄圧したタンクのパルプを開放し、円管上部から下部方向へ圧縮空気を送風する。すぐに錘の支持ピンを外し、錘を圧縮空気で加速してリベットに衝突させる。

④ 錘の打撃力により、板の上面に設置しておいたリベット軸が薄板を打抜き、その後、ダイス内部に設置しておいたリベットホルダーの穴に入る。さらに、リベット軸の先端がダイスと衝突することにより塑性変形してリベットホルダーの穴に充満し、リベット軸とリベットホルダーが結合されて薄板が締結される。

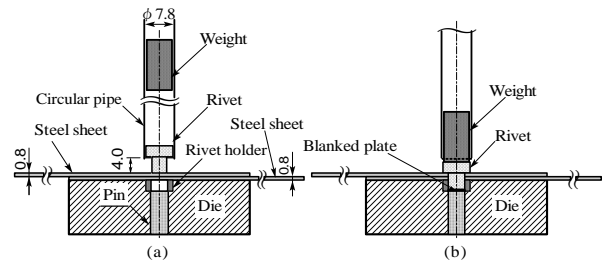


図1 衝撃荷重による締結法の概略

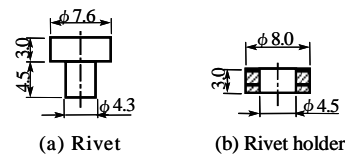


図2 リベットとリベットホルダー

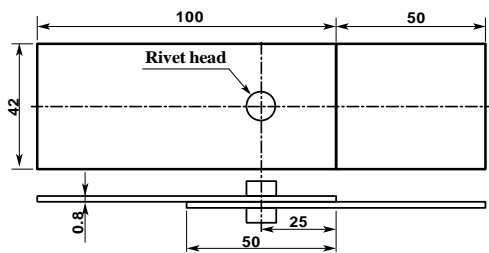


図3 継手

錘は直径 7.5mm、長さ 21mm、質量 7.2g の SKD11 の円柱試片を用いた。圧縮空気により錘に平均約 119m/s の速度を与えてリベット頭部に衝突させた。

図4は準静的荷重による締結法の概略を示している。以下の手順で継手を作製した。
①図4に示すダイス内部に片方のリベット頭部となるリベットホルダーを設置する。そして、ダイスの上に締結対象の2枚の薄板を設置する。さらに板の上面にリベットを軸の先端が接する状態で設置する。

②ガイドの穴にステムを挿入した後、オートグラフを用いて所定の速度でリベットを薄板に押し込む。

③リベット軸が薄板を打ち抜いてリベットホルダーの穴に入る。さらにリベット軸の先端がダイスに当たり、荷重が上昇するが、所定の荷重に到達後に除荷する。その結果、リベット軸が塑性変形して太ることでリベットホルダーの穴に充満し、リベットホルダーと結合されて板が締結される。リベットの圧縮速度は、10mm/min と 1000mm/min の2通りで、リベットの最大圧縮荷重は、25kN、30kN、35kN の3通りとした。

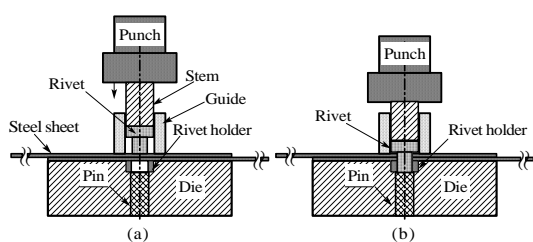


図4 準静的荷重による締結法の概略

(2) インパクトリベット締結法により作製された継手の分解に関する検討方法

リベットとリベットホルダーには S15CK を使い、板材には厚さ 0.8mm の SPCC 薄板材を 50×100mm に加工した。分解荷重を低下させるために検討したリベットとリベットホルダーの形状を図5に示す。リベット頭部とリベットホルダーが六角形のは、リベット軸とリベットホルダーを相対的にねじっ

て締結をゆるめてから分解することで摩擦の分解荷重への影響を検討した。また、リベットホルダーの段付きの穴やクリアランスの違いによる分解荷重への影響を検討するためにリベットとリベットホルダー形状と寸法を種々変化させた。リベット A, B はそれぞれリベット頭部およびリベットホルダーが円形と六角形でリベットホルダー内に段がある場合。C, D はリベットホルダー内の段を無くして、テーパを施した場合、 l は C で 5.4mm、D で 6.5mm とした。E, F はリベット軸とリベットホルダーの穴の間のクリアランスが異なる形状となっている。E の d_1 は 5.2mm、 d_2 は 6.2mm とし、F の d_1 は 5.3mm、 d_2 は 6.3mm とした。

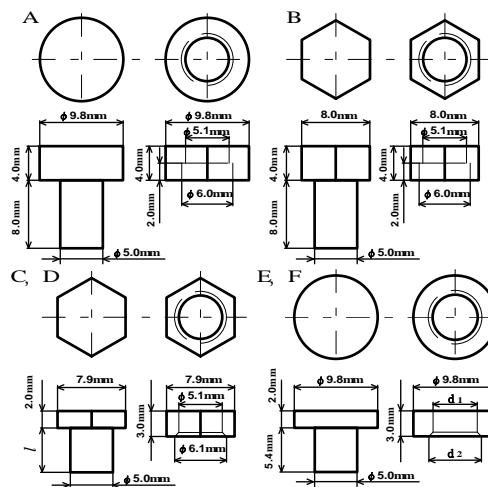


図5 分解荷重を低下させるために検討したリベットとリベットホルダーの形状

リベット締結法にはインストロン万能試験機を用いて準静的荷重により締結を行った。作製した継手に対して、図6に示すように、継手の締結時とは逆方向からピンを用いてリベット軸をリベットホルダーから押抜くことにより分解し、そのときの最大分解荷重を測定した。

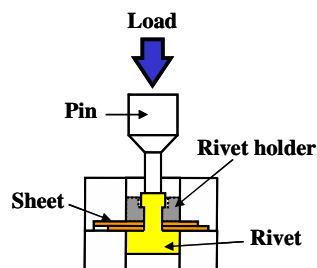


図6 継手の分解試験

(3) インパクトリベット締結法により作製された継手の締結強度が向上するメカニズム

ムの検討方法

メッシュレス解析法である SPH 法は物体が大変形する場合や物体が細かな破片に砕けるような場合のシミュレーションに有用な解析法である。本研究では、軸対称 SPH 法に radical return 法を導入した解析プログラムを作成した。その解析プログラムを用いて、図 7 に示すようなダイスに固定した Al 合金の薄板試験片に鋼製円柱状のパンチを飛翔体として衝突・貫通させる高速穴あけシミュレーションを行った。このシミュレーションでは塑性変形により温度上昇を考慮した。

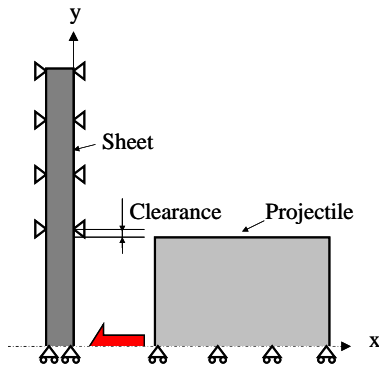


図 7 高速穴あけシミュレーションの解析モデル

また、SPH 法による解析プログラムを改良し、リベット軸による薄板の打抜きとその後のリベットとリベットホルダーの結合という連続した締結過程のシミュレーションを試みた。図 8 にその解析モデルを示す。

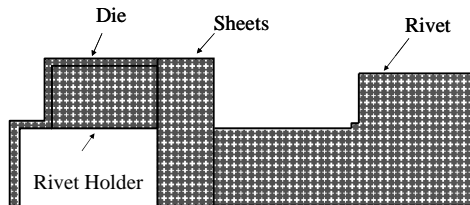


図 8 衝撃荷重を用いたリベット締結シミュレーションの解析モデル

4. 研究成果

(1) インパクトリベット締結法における打撃方法に関する検討結果

図 9 は 3 種類のリベット締結法により作製した継手の一例を示している。図は左からそれぞれ、リベットを圧縮した方向から見た場合、側面から見た場合、裏面から見た場合を示している。図 9 (a) と (b) の継手の写真から、リベットを 10mm/mim の速度で圧縮することにより、衝撃荷重を用いた締結法と同じように 2 枚の薄板を穴あけ加工無しで締結できることが明らかになった。なお、継手の面外変形は衝撃荷重による締結法が一番小

さく、かしめ加工が一番大きくなった。

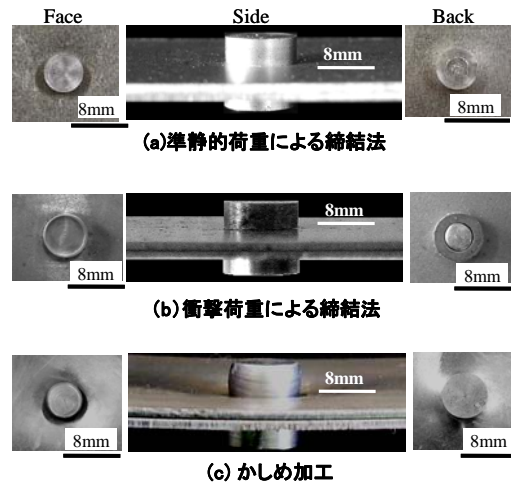


図 9 継手の締結状態

図 10 は準静的荷重と衝撃荷重を用いた締結法により作製した継手に関して、穴あけ過程の際にリベット軸により打ち抜かれた薄板の穴の切り口の状態を示している。この図から、準静的荷重による 10mm/min の打抜き速度の場合の切り口面には、一般的な板のせん断による切り口面と同じように、だれ、せん断面、および破断面が観察される。そして、平滑なせん断面の領域よりも凸凹の破断面の占める領域が大きいという特徴がある。衝撃荷重による 119m/s の打抜き速度の場合の切り口面は、ほぼ全域がせん断面になっており表面が平滑である。このことから、薄板の打抜き速度が切り口面の状態に影響を与えることは明らかである。切り口面の状態は衝撃荷重による締結法が準静的な荷重による締結法よりも優れているといえる。

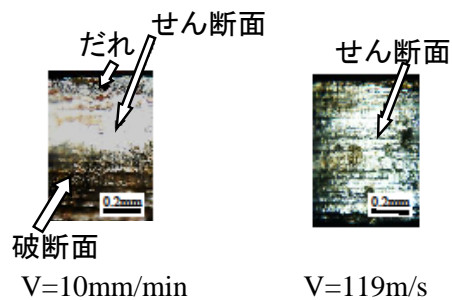


図 10 板穴の切り口の状態

継手強度を検討するために継手の作製条件を表 1 に示す。図 11 は各締結法により作製した継手の引張せん断試験による締結強度を比較したものである。プロット点は最大引張荷重の平均値を表し、エラーバーが示す範囲は標準偏差を表している。なお、準静的荷重により作製した継手(T1~T3)及びかし

め加工による継手(T5~T7)の引張試験は各5本ずつ行い、衝撃荷重を用いて作製した継手(T4)の引張試験は10本行っている。

表1 継手の作製条件

Test No	Methods	Conditions of riveting
T1	Quasi-static punching	Compressive load =25.0 kN
T2		Compressive load =30.0 kN
T3		Compressive load =35.0kN
T4	Impact riveting method	Velocity of rivet =119m/s
T5	Caulking	Riveting force =27.5 kN
T6		Riveting force =30.0 kN
T7		Riveting force =32.5 kN

準静的荷重による締結法とかしめ加工により作製した継手の強度には、継手作製時の最大圧縮荷重が増加するにつれて継手の強度は増加する傾向にある。また各締結法により作製した継手の強度はほぼ同等であった。

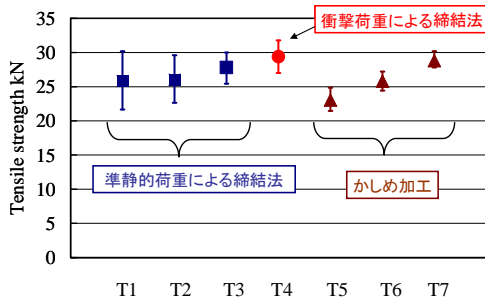


図11 締結強度の比較

以上のことから、準静的荷重を用いた締結法は継手の面外変形や薄板の穴の切り口面の状態などで衝撃荷重を用いた締結法よりもやや劣っている部分はあるが、2枚の薄板を穴あけ加工無しで締結でき、継手強度も十分に高いことから、準静的荷重による締結法は実際に使用できることが明らかになった。準静的荷重による締結は汎用プレスで行えることから特殊な設備は必要なく、また設備のコンパクト化が可能なことから実用化に向けて有益な結果が得られた。

(2) 継手の分解荷重を低下させるためのリベットとリベットホルダーの形状の検討

図5に示すすべてのリベットとリベットホルダーに関する締結実験の結果、すべての組み合わせで良好な継手を得られた。また締結した継手を用いて引張せん断試験を行い、締結強度を比較した結果、すべての継手でリベット軸がせん断破壊を起こすことなく、

薄板から破壊した。その時に得られた最大引張荷重をまとめたものを図12に示す。図より、リベットホルダーの形状を変化させても継手強度に大きな影響は無いことが分かった。さらに締結した継手に対して、図6に示す分解試験を行った。最大分解荷重をまとめたものを図13に示す。図中のtwistingはリベット軸とリベットホルダーを相対的にねじったことを表している。ねじることによる分解荷重の低下への効果は得られなかったが、リベットホルダーの段を無くし、テーパを施すことによって、最大分解荷重を下げることができた。さらにクリアランスを調整することでも最大分解荷重を下げられることも明らかになった。

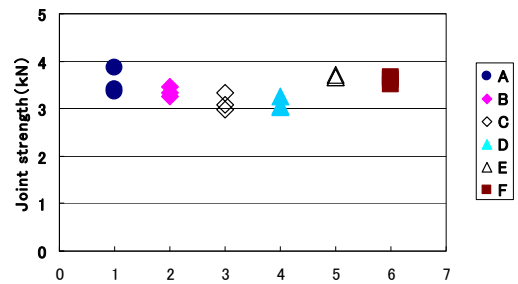


図12 リベットとリベットホルダーの形状による締結強度の比較

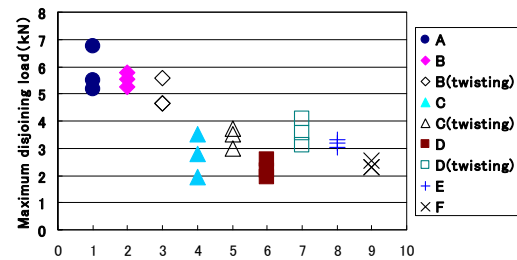


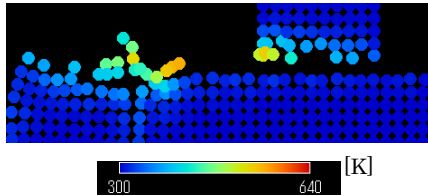
図13 リベットとリベットホルダーの形状による最大分解荷重の比較

(3) インパクトリベット締結法により作製された継手の締結強度が向上するメカニズムの検討結果

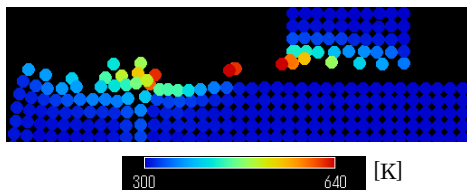
図7の解析モデルに示したように、厚さ1mmの円板にパンチである円柱状飛翔体が80m/sと140m/sで高速衝突し貫通する場合の軸対称SPH解析を行った。粒子要素の直径は $2 \times 10^{-4}m$ とした。解析には打抜き速度の影響を明確にするためにJohnson-Cookモデルを用いた。板材はアルミニウム合金2024Al、パンチはAISI4340鋼材とした。

図10に示した板穴の切り口面の改善は温度上昇と関連づけられると考え、図14に貫通部分の変形の状態と温度分布のシミュレーション結果の一例を示す。ひずみが集中することにより貫通した周辺のみで温度上昇

を起こしており、さらに衝突速度が速いほど温度は高くなる傾向がある。また衝突速度が速いと板穴の切り口面がやや滑らかになり、衝突速度が遅いと飛翔体の側面は凸凹に変形した。解析結果は実験結果を定性的に表現できている。



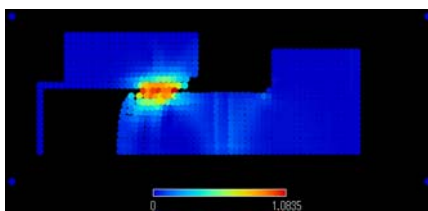
(a) 衝突速度 80m/s の場合



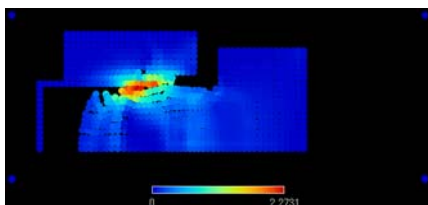
(b) 衝突速度 140m/s の場合

図 14 SPH 法による貫通部分の変形状態と温度結果

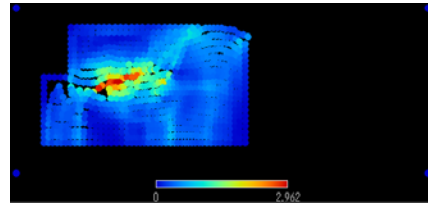
さらに、SPH 法の解析プログラムを改良し、図 8 に示した解析モデルに対して衝撃荷重を用いた締結法の締結過程を解析した結果の一例を図 15 に示す。図はそれぞれ 15 μ s、30 μ s、45 μ s の時点での相当塑性ひずみの分布を示している。図より、リベット軸部が膨らみ太っており、打抜かれた薄板の下部が広がるように変形している様子は実験と同じである。しかしながら、板のせん断による切り口面はむしりとられるようになっており、せん断過程が十分に表現できていないように



(a) 15 μ s



(b) 30 μ s



(c) 45 μ s

図 15 SPH 法による衝撃荷重による締結過程のシミュレーション例

考えられる。せん断による破壊条件の検討と適切な材料パラメータの選定が必要であることが明らかになったが、本解析法により非常に複雑な薄板の打抜きとリベットとリベットホルダーの結合という連続した複雑な締結過程を定性的に表現することができた。インパクトリベットの解析法として有望であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

①木之下広幸, 海津浩一, 小林太一, 池田清彦, パンチングリベット法による冷間圧延鋼板の締結, 日本機械学会論文集 C編(Web), 査読有, Vol.77, 2011, 3184-3192, https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaic/77/780/77_780_3184/_pdf

〔学会発表〕(計 4 件)

①北出朋也, 海津浩一, 日下正広, 木村真晃, 解体可能な打抜きリベット締結法におけるリベット形状の検討, 日本機械学会関西支部第 87 期定時総会講演会, 2012 年 3 月 17 日, 関西大学

②海津浩一, 日下正広, 木村真晃, 木之下広幸, 衝撃リベット締結法による締結特性の検討, 日本材料学会材料の衝撃問題シンポジウム, 2011 年 12 月 23 日, 法政大学

③北出朋也, 海津浩一, 日下正広, 木村真晃, 解体可能な打抜きリベットの開発, 日本機械学会関西支部関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 2011 年 3 月 18 日, 京都工芸繊維大学

④海津浩一, 日下正広, 木村真晃, 木之下広幸, 円柱状飛翔体の衝突による薄板の穿孔に関する基礎研究, 日本機械学会機械材料・材料加工技術講演会論文集, 2010 年 11 月 26 日, 東京大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

海津 浩一 (KAIZU KOICHI)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50177317