

金属薄板の電磁圧接

相沢 友勝* 岡川 啓悟*

1. はじめに

電磁圧接、電磁溶接、電磁接合などと呼ばれる溶接法は、間隙を設けて重ねた金属製の円管／円柱または可動板／固定板へ高密度磁束を急激に加え、互いを接合させる¹⁾。急激に磁束が加わった円管または可動板は、加速され、200 m/s 以上の高速で、それぞれ円柱または固定板に衝突して固相接合する。この間の時間は100 μ s 以下であり、熱影響をほとんど受けない。高密度磁束を加えるため、コイルに大電流を短時間だけ流す装置を使用する。

円管を電磁圧接する研究は国外で始まり、昭和35年に国外から出願された特許が国内で公告された²⁾。その後、国内でも円管を中心に接合結果が報告され始めた³⁾。平板を接合する考えもあった⁴⁾。しかし、平板の接合結果は、国内外で見られなかった。平板を電磁圧接するのに適したコイルの開発が困難だったからである。筆者らは、高密度磁束を局所的に発生できる平板状コイルを考案した。当初の使用目的は、電磁力で金属薄板に穴をあける電磁穴あけ用であった⁵⁾。このコイルが電磁圧接にも適したので、平成11年に金属薄板を電磁溶接する特許を出願し、登録された⁶⁾。

金属薄板を対象とする電磁圧接は、日本発の技術であり、多数の研究論文^{7)~31)}、学会報告^{32)~47)}に加え、5社から関係する特許^{48)~52)}が出願されており、学会、産業界に関心が広まっている。板に対する電磁圧接の研究は、国外でも数年前から行われている^{53)~56)}。

ここでは、金属薄板（箔などを含む）の電磁圧接について、平板状コイル、圧接原理、接合界面、圧接装置、各種圧接例について紹介する。

2. 平板状コイルおよび圧接原理

2.1 平板状コイル

典型的な平板状コイルの概略を図1に示す。1枚の銅合金板に2本の切り込みを加えたE字形状である。板の幅が狭く、細長い中央部分（幅5mm）は行きの電流用、その両側の幅の広い周辺部分は帰りの電流用である。電源からパルス大電流を流すと、電流が集中するコイル中央部分に高密度磁束が発生する。コイル巻数は1であり、平板状ワルターンコイルと呼ばれる。行きと帰りの電流間に働く電磁力が、コイル中央部分で互いに打ち消される構造になっている。コイル断面内の記号（○の中に×）は、電流の方向が紙面の表から裏へ向かって流れることを示す。

2.2 圧接原理⁵⁷⁾

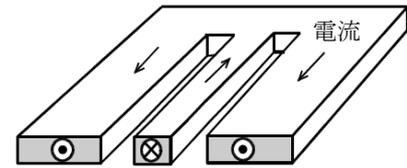


図1 平板状ワルターンコイル概略図

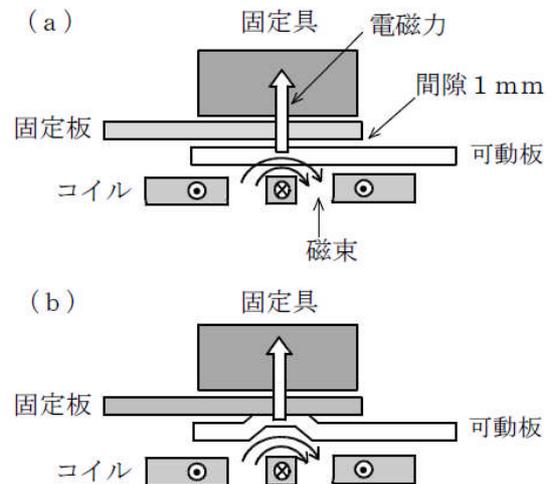


図2 圧接原理説明図 (a) 圧接前, (b) 圧接後

電磁力を用いて銅またはアルミニウム製の可動板を金属製固定板へ電磁圧接する原理を説明する。約1mmの間隙を設けて重ねた可動板、固定板、前述のコイル、コイル中央部分に発生する磁束の断面を図2に示す。コイルに大電流が瞬間的に流れると、その中央部分に高密度磁束が急に発生する。この磁束が可動板に交差すると、可動板には渦電流と呼ばれる誘導電流が流れる¹⁷⁾。磁束は可動板の中へ浸入しにくくなる。可動板とコイルの間に閉じ込められた磁束は、外側へ広がろうとするので、可動板を上側へ圧する。この圧力は磁気圧力と呼ばれ、渦電流に働く電磁力と等価な力である⁵⁸⁾。

急激な電磁力を受けた可動板は、図2(b)、図3のように変形しながら上側の固定板へ高速で衝突する。最初に衝突する部分は変形部分の中央（図3の初期衝突点）である。その後、この部分（衝突点）は図3のように金属ジェットを発生しながら、外側へ移動する。この過程で接合面は、クリーニングされ、図3のように波状模様が生じる。電磁力の大きさ、その時間変化率、間隙などを適切に選ばば、衝突した可動板と固定板は溶けることなくコイル中央部分

*東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科
塑性と加工 52 巻 (2011) に掲載済み原稿

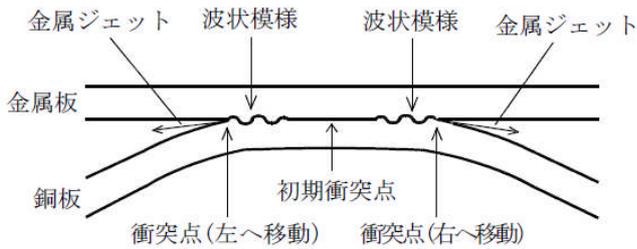


図3 衝突現象のイメージ (断面概略図)

に沿って連続して圧接 (シーム溶接) される。

なお、渡邊、熊井、筆者らは、衝突現象、金属ジェットの発生を高速ビデオカメラで共同観測している^{11), 20)}。筆者らは衝突時間の測定^{8), 9)}、Serizawaら、宮崎らは衝突現象の理論的研究^{31), 36)}を行っている。

3. 接合界面

3.1 全体の様子

可動板を固定板にシーム溶接 (圧接) した継手の接合界面全体を光学顕微鏡で観測した例を図4に示す。シーム溶接方向に垂直な断面写真である。固定板 (上側) に変形した可動板 (下側) が衝突して圧接している。この接合部分には、図4の説明図のように、2ヵ所の接合部とその間の非接合部が存在した。この部分の長さ4~5mmはコイル中央部分の幅5mmにほぼ等しかった。各接合部分の幅は約1mmである。

3.2 波状模様の様子

波状模様は図4(c)に示す2ヵ所の接合部分にそれぞれ対称的に生じる。観測結果は、渡邊、熊井ら、Kashaniら、松田ら、筆者らによって報告されている^{19), 26), 28), 30), 38), 40)}。光学顕微鏡で観察した結果を図5および図6に示す。波状模様の波長は、初期衝突点 (図3) から離れるほど増大した。波状模様は圧接条件および板の材質によって変化した。

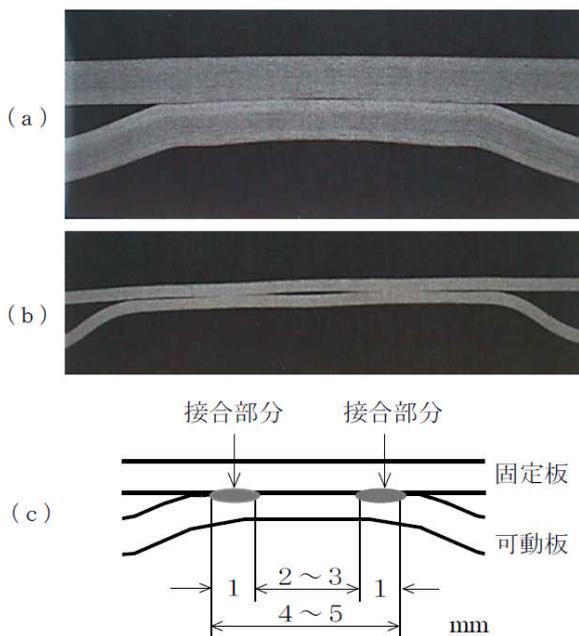


図4 接合界面全体の様子 (材質: アルミニウム)
(a) 板厚 1 mm, (b) 板厚 0.3 mm, (c) 説明図

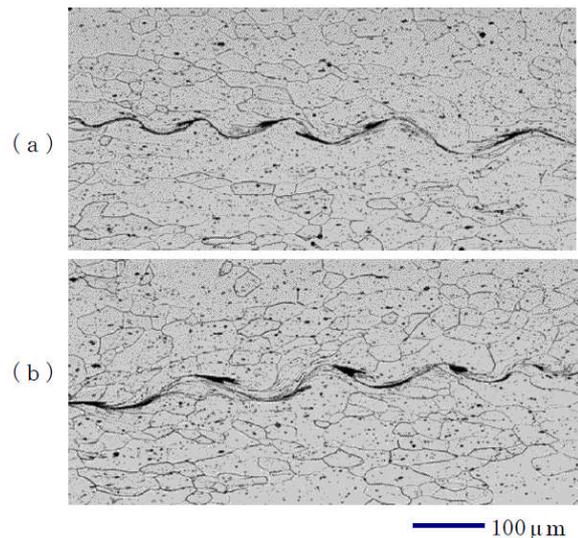


図5 接合部分に生じる波状模様 (材質: アルミニウム)^{19), 38)}
(a) 左側接合部分, (b) 右側接合部分

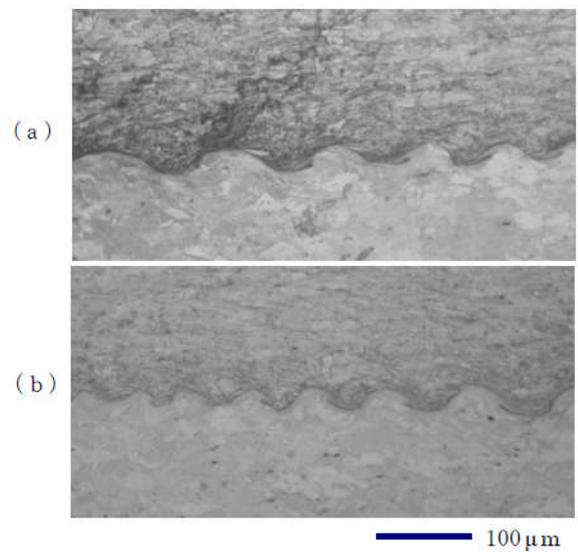


図6 接合部分に生じる波状模様 (材質: 銅および銅合金)^{30), 38)}
(a) 左側接合部分, (b) 右側接合部分

また、Serizawaら、Zhangら、Koreらも実験的、理論的な研究成果を発表している^{29), 31), 54), 56)}。波状模様が発生する現象は爆発圧接⁶¹⁾とよく似た現象である。

4. 圧接装置^{6), 16)}

平板状ワンターンコイルに大電流を急激に流すためコンデンサ放電装置を使用する。装置の構成要素を図7に示す。点線で囲まれた部分が放電回路である。コンデンサ電源を充電し、放電スイッチを閉じ、コイルに放電電流を流す。通常、コンデンサ電源の静電容量は20~400 μ F、この電源を充電する電圧は数~20 kV、充電するエネルギーは数 kJ、流れる電流の最大値は約 200 kAであり、流れる時間は100 μ s以下である。

典型的な平板状コイルの外観を図8に示す。銅合金製の板厚は3 mmである。図1の状態に接続用端子板が付いている。この部分を絶縁して使用する。コイル中央部分の長さは図8左側の場合、約300mm、その幅は5 mmである。

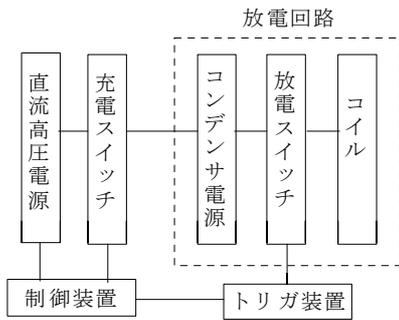


図7 装置の構成要素



図8 平板状ワンターンコイルの外観（3種類）

5. 各種圧接例

5.1 板の圧接（外観および圧接痕跡）^{11), 57)}

圧接された継手（アルミニウム A5052／鋼 SPCC）の外観を図9に示す。アルミニウム板が可動板である。中央部分100mmが端から端まで縦に圧接（シーム溶接）されている。アルミニウム板側から見た圧接部分は、幅10mm程度の幅で変形している。鋼板には変形が生じない。

この継手を無理にはく離させたときの接合面を図10に示す。接合面は全面的には圧接されず、図10のように縦長の環状に圧接される。端部を除けば、2本線状にシーム溶接される。この2本線は図4（c）に示す2カ所の接合部分に対応している。

この継手の接合界面にも波状模様が観測されている。接合部分の引張せん断強度は約250MPaであり、母材（アルミニウム）で破断する結果が得られている。

5.2 板の圧接（できること）

- ①銅、アルミニウムなど良導電性の可動板（板厚約2mm以下）を各種固定金属板へ圧接できる。
- ②アルミニウム／鋼^{7), 24), 25), 57)}、アルミニウム／高張力鋼¹¹⁾など性質の大きく異なる異種金属板も圧接できる。
- ③ステンレス鋼など比較的導電率の良くない金属板同士も工夫して圧接できる¹³⁾。
- ④アルミニウムを可動板としてシーム溶接長さ1mまで1度の放電で圧接できる¹⁶⁾（図11）。
- ⑤銅およびアルミニウム板を多層に重ねて同時に圧接できる³³⁾（図12）。
- ⑥コイルを工夫すれば、アルミニウム板を円形状に周回させて圧接できる¹⁵⁾。
- ⑦アルミニウム板をT字継手として圧接できる³²⁾（図13）。

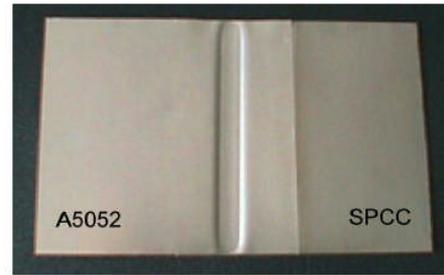


図9 圧接された継手の外観（板幅：100mm）

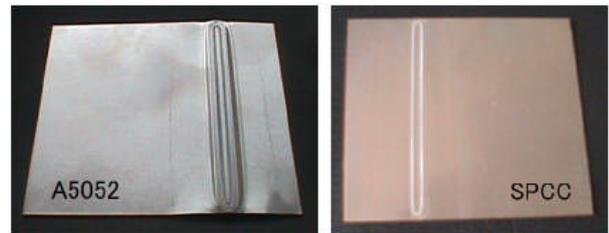


図10 圧接後はく離させた接合面



図11 圧接された継手（A1050／SPCC，シーム溶接長さ：1m）

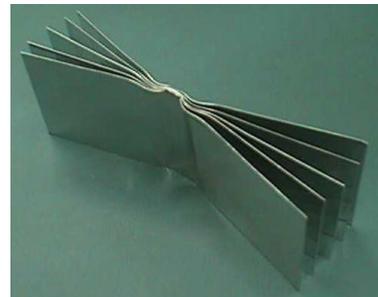


図12 多層に重ねた板の同時圧接例（圧接方向板幅：50mm）

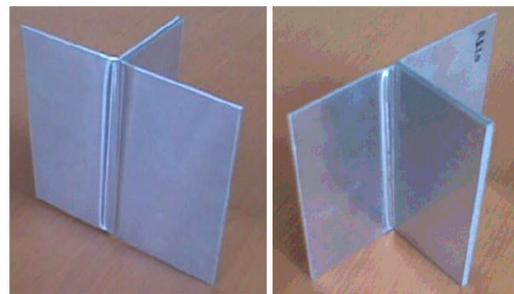


図13 T字継手として圧接されたアルミニウム板

- ⑧アルミニウム板を裏当て板として用いれば、銅板などを突合せ継手として圧接できる⁴³⁾。

5.3 箔の圧接

(1) 圧接方法 箔同士を圧接する場合、箔が溶けやすいのでアルミニウム板を可動板として用い、この圧力を利用して圧接するのが一般的である^{18), 23)}。銅箔同士を直接圧接す

ることも可能であるが、コイル形状に工夫が必要である³⁹⁾。

(2) 箔の圧接（できること）

- ①厚さ約 $10\mu\text{m}$ の銅箔同士を圧接できる²³⁾ (図14, 図15)。
両面に溶融、凝固した部分は見られない。
- ②樹脂付き銅箔（片面に樹脂シートが貼られている銅箔）の銅箔面同士を圧接できる²³⁾ (図14, 図16)。このとき、樹脂シートは溶融または破壊しない。
- ③ニッケル箔²³⁾、アモルファス金属箔⁴¹⁾、金属ガラス箔⁴⁶⁾などほとんどすべての箔を圧接できる。
- ④圧接できた最薄箔厚は $6.5\mu\text{m}$ である¹⁸⁾。

5. 4 電気・電子部品の圧接

(1) 圧接方法 端子板／電線など良導電性電気部品の圧接は、幅が 10mm 以下と狭いので、重ねた部品をコイル上に多数並べ、板の場合と同様に行われる^{12), 21)}。並べた部品は同時に圧接される。樹脂付き配線用銅箔（フレキシブルプリント配線銅箔など）の圧接は、アルミニウム板（可動板）を用い、この圧力を利用して行われる^{14), 22)}。

(2) 部品の圧接（できること）

- ①銅またはアルミニウム端子板（板厚 $0.2\sim 0.5\text{mm}$ 、板幅数 mm 、以下同じ）同士を重ね、多数同時に圧接できる。
- ②端子板を可動板とし、固定した各種電線へ同様に圧接できる（図17）。
- ③フレキシブルプリント配線銅箔（配線幅 $1\sim 5\text{mm}$ ）同士を重ね、同様に圧接できる（図18）。
- ④フレキシブルプリント配線銅箔（配線幅 5mm ）に対し、直径 1mm 以下のスポット溶接（圧接）ができる⁴²⁾。

6. おわりに

金属薄板の電磁圧接について広く紹介した。これまで、電磁圧接の実験（本校）、電磁圧接用溶接機の試作（（株）中央製作所）、電磁圧接の応用研究（住友軽金属工業（株）、（株）神戸製鋼所、（株）東芝、矢崎総業（株）など）、電磁圧接継手の状態を詳しく調べる研究（東京工業大学、千葉大学など）、電磁圧接の理論的研究（大阪大学、長野工業高等専門学校など）などが行われてきた。いずれも先駆的な研究であり、大きな成果が得られている。

現在、銅、アルミニウム板を中心にステンレス鋼¹³⁾、めっき鋼³⁷⁾、マグネシウム^{34), 55), 57)}など各種金属薄板の電磁圧接が可能である。異種金属板、例えばアルミニウム／鋼の接合界面には、厚さ数 μm 程度の中間層が生じる。しかし、一般的な柔らかい金属間化合物ではないことが、Watanabe, Kumai, Leeらによって金属組織的に詳しく調べられている^{26), 28), 44)}。実用化で問題となる電磁反発力による平板状コイルの変形に対する解決策も示されている³⁵⁾。今後は期待される接合法である。

なお、重ねた金属薄板を、衝突させずに電磁圧接することもできる^{17), 47)}。圧接に必要な電源エネルギーが2倍以上になる¹⁷⁾。この接合界面にも波状模様が観測される⁴⁷⁾。衝突させずに圧接する場合、渦電流による加熱が圧接に大きく関係すると思われる。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：塑性加工便覧，(2006)，805-807，コロナ社。

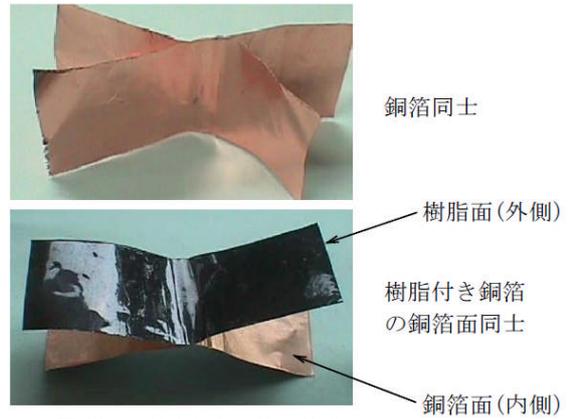


図14 圧接された銅箔の外観

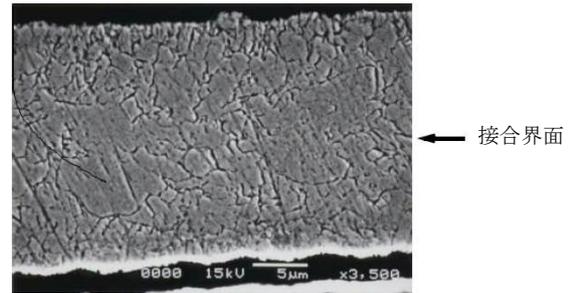


図15 圧接された銅箔（厚さ約 $10\mu\text{m}$ ）の接合界面²³⁾

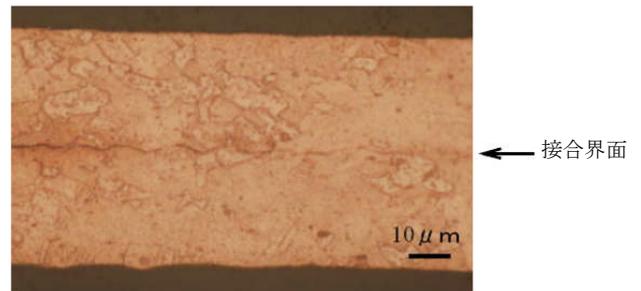


図16 圧接された樹脂付き銅箔（厚さ $35\mu\text{m}$ ）の接合界面^{22), 23)}

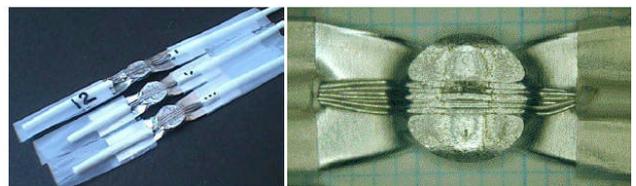


図17 圧接された端子板と電線(より線)
3組同時接続 接続部分(1組)の拡大図

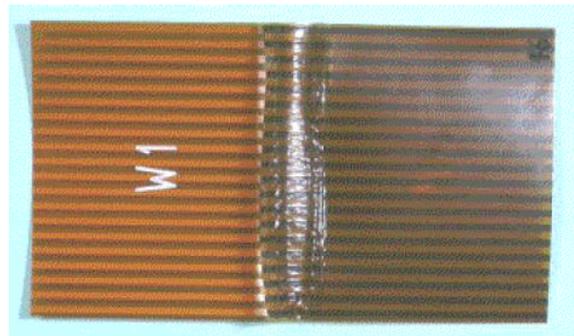


図18 片面の端部が露出されたフレキシブルプリント配線銅箔（箔幅 1mm 、20本）同士の同時接続

- 2) 特許：出願公告番号昭 35-11813.
- 3) 溶接学会編：溶接・接合便覧，(2003)，470-471，丸善.
- 4) U. S. Patent No.3520049.
- 5) 相沢友勝：塑性と加工，**38**-438 (1997)，621-625.
- 6) 特許：登録番号 3751153.
- 7) 相沢友勝：塑性と加工，**44**-512 (2003)，957-959.
- 8) 岡川啓悟・相沢友勝：塑性と加工，**47**-546 (2006)，632-636.
- 9) 岡川啓悟・相沢友勝：塑性と加工，**48**-555 (2007)，323-327.
- 10) 岡川啓悟・相沢友勝・広橋光治・石橋正基：塑性と加工，**50**-585 (2009)，936-940.
- 11) 相沢友勝：溶接学会誌，**77**-8 (2008)，718-721.
- 12) 花崎健一・相沢友勝・Kashani, M.：溶接技術，**54**-7 (2006)，64-67.
- 13) 田村雅貴・牧野吉延・相沢友勝・岡川啓悟：溶接技術，**55**-2 (2007)，65-67.
- 14) 杉山善崇・花崎健一・相沢友勝・岡川啓悟：溶接技術，**57**-6 (2009)，87-92.
- 15) 相沢友勝：軽金属溶接，**44**-1 (2006)，20-25.
- 16) 相沢友勝・熊谷正樹・岡川啓悟：軽金属溶接，**48**-5 (2010)，158-162.
- 17) 相沢友勝：軽金属，**54**-4 (2004)，153-158.
- 18) 宮崎忠・岡川啓悟・相沢友勝・熊谷正樹：軽金属，**57**-2 (2007)，47-51.
- 19) 渡邊満洋・熊井真次：軽金属，**59**-3 (2009)，140-147.
- 20) 渡邊満洋・熊井真次：軽金属，**59**-9 (2009)，502-508.
- 21) 相沢友勝・Kashani, M.・花崎健一：電子情報通信学会技術研究報告，**105**-485 (2005)，19-24.
- 22) 相沢友勝・花崎健一・岡川啓悟：電子情報通信学会技術研究報告，**107**-408 (2007)，35-38.
- 23) 相沢友勝・岡川啓悟：電子情報通信学会技術研究報告，**108**-368 (2008)，5-10.
- 24) Aizawa, T.：Welding International，**18**-11 (2004)，868-872.
- 25) Aizawa, T., Kashani, M. & Okagawa, K.：Welding in the World，**49** (2005)，212-222.
- 26) Watanabe, M., Kumai, S. & Aizawa, T.：Materials Science Forum，**519**-521 (2006)，1145-1150.
- 27) Aizawa, T., Kashani, M. & Okagawa, K.：Welding Journal，**86**-5 (2007)，119s-124s.
- 28) Lee, K. J., Kumai, S., Arai, T. & Aizawa, T.：Materials Science and Engineering A，**471** (2007)，95-101.
- 29) Serizawa, H., Shibahara, I., Rashed, S. & Murakawa, H.：Transactions of JWRI，**38**-1 (2009)，63-68.
- 30) Kashani, M., Aizawa, T., Okagawa, K. & Sugiyama, Y.：IEICE Technical Report EMD，**109**-287 (2009) 29-31.
- 31) Serizawa, H., Shibahara, I., Rashed, S. & Murakawa, H.：Materials Science Forum，**638**-642 (2010)，2166-2171.
- 32) 相沢友勝・岡川啓悟・Kashani, M.：第 55 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2004)，353-354.
- 33) 岡川啓悟・相沢友勝・松澤和夫・高橋栄一・磯部拓磨・石橋正基：平成 20 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2008)，145-146.
- 34) 磯部拓磨・高橋栄一・松澤和夫・岡川啓悟・相沢友勝：平成 20 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2008)，315-316.
- 35) 相沢友勝・岡川啓悟・Kashani, M.：平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2009)，185-186.
- 36) 宮崎忠・佐々木邦哲・岡田昌樹：第 60 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2009)，143-144.
- 37) 小町拓也・岡川啓悟・糸井貴臣・広橋光治：第 60 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2009)，355-356.
- 38) 相沢友勝・岡川啓悟・熊井真次・渡邊満洋：平成 22 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2010)，217-218.
- 39) 相沢友勝・岡川啓悟・杉山善崇：第 61 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2010)，169-170.
- 40) 松田正文・米永裕司・増田幸一・小崎崇・相沢友勝：溶接学会全国大会講演概要 70 集，(2002)，268-269.
- 41) 相沢友勝・渡邊満洋・熊井真次・米山夏樹：溶接学会全国大会講演概要 78 集，(2006)，174-175.
- 42) 杉山善崇・花崎健一・相沢友勝・岡川啓悟：溶接学会全国大会講演概要 85 集，(2009)，214-215.
- 43) 相沢友勝・岡川啓悟：溶接学会全国大会講演概要 87 集，(2010)，24-25.
- 44) 新井貴・李光鎮・熊井真次・佐藤彰一・相沢友勝：軽金属学会 107 回秋季講演会概要集，(2004)，295-296.
- 45) 渡邊満洋・熊井真次・石内健太郎・梶山修平・相沢友勝：軽金属学会 112 回春季講演会概要集，(2007)，119-120.
- 46) 萩本豪・熊井真次・渡邊満洋・相沢友勝・岡川啓悟：軽金属学会 115 回秋季講演会概要集，(2008)，167-168.
- 47) 相沢友勝・岡川啓悟：日本機械学会第 9 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集，(2001)，99-100.
- 48) 特許：登録番号 3852823，登録番号 3852824，登録番号 3942081，登録番号 3942082，登録番号 3966502，登録番号 4024119.
- 49) 特許：登録番号 4313276，公開番号 2006-088172.
- 50) 特許：公開番号 2007-216270.
- 51) 特許：公開番号 2007-229755.
- 52) 特許：公開番号 2007-048522，公開番号 2008-126235.
- 53) Kore, S.D., Date, P.P. & Kulkarni, S.V.：Int. J. of Impact Engineering，**34**-8 (2007)，1327-1341.
- 54) Zhang, Y., Babu, S.S, Zhang, P., Kenik, E.A. & Daehn, G.S.：Science and Technology of Welding & Joining，**13**-5 (2008)，467-471.
- 55) Kore, S.D., Imbert, J., Worswick, M. J. & Zhou, Y.：Science and Technology of Welding & Joining，**14**-6 (2009)，549-553.
- 56) Kore, S.D., Dhanesh, P., Kulkarni, S.V & Date, P.P.：Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics，**32**-1 (2010)，1-9.
- 57) 相沢友勝ほか 22 名：最新「異種材料」の接着・接合トラブル対策事例集，(2006)，49-58，技術情報協会.
- 58) 日本塑性加工学会編：高エネルギー速度加工，(1993)，163-165，コロナ社.
- 59) 日本塑性加工学会編：高エネルギー速度加工，(1993)，67-73，コロナ社.