

電磁圧接されたアルミニウム薄板と低炭素鋼板の接合性

東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科

准教授 石橋 正基

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016022)

キーワード：電磁圧接，異種金属接合，電磁誘導加熱

1. 研究の目的と背景

近年，自動車の軽量化による燃費向上を目的として，自動車を構成する材料の種類を部位によってアルミニウム合金等の軽量板に換える車体のマルチマテリアル化が進んでいる．マルチマテリアル化を行うには，異種金属を高強度，広範囲で接合することが求められる．

電磁圧接は，平板状ワンターンコイルにパルス大電流を流し，コイル正面に置かれた可動薄板を他方の固定薄板に重ねシーム接合する技術である．2枚の薄板間に間隙を設けると，反円筒状に変形する可動薄板が間隙内を高速変形し，固定薄板に連続衝突する効果のため，低い放電エネルギーで接合できる^{1),2)}．また，大きな電磁力を得るため，可動薄板には高導電率のアルミニウムや銅が多く用いられ，これらの薄板の接合に適した接合法であるといえる．これまで純アルミニウム薄板同士の接合，純銅薄板同士の接合に関して，接合性に及ぼす要因等が詳しく調べられている³⁾．

しかし，先に述べた自動車のマルチマテリアル化において，熱処理された 6000 系などのアルミニウム合金薄板と低炭素鋼板などの異種金属板の圧接が求められる^{4)~6)}．異種金属の電磁圧接板の接合性は，衝突速度と衝突時間に加え，可動薄板と固定薄板の材料特性に依存すると考えられるが，詳しく調べられていない．

本研究では，間隙長を変えて得られる2種類のアルミニウム（可動薄板）と低炭素鋼（固定薄板）の電磁圧接板について，接合強さ，接合可能な間隙長範囲および接合要因について述べる．また，固定薄板である低炭素鋼板を加熱し，軟化させることによって，硬い材料を用いても電磁圧接が可能になるのではないかと推測される．薄板の加熱方法としては，ヒーターで加熱する方法，高周波誘導加熱（IH）で加熱する方法，直に電流を流して加熱する方法が挙げられる．本研究では，固定薄板を誘導加熱により高温に加熱し，高硬度材料の電磁圧接を可能にすることを目的としている．

2. 電磁圧接の原理および可動薄板の変形

E 字形の平板状ワンターンコイル，スペーサによって間隙が設けられた2枚の金属薄板，固定具および2つの電流と磁束の断面を図1に示す．コイル電流 I （放電電流）は両側の周辺部（ \odot ）から細長い中央部（ \otimes ）に集中して流れる．コイル中央部の電流密度は高くなり， y 方向に沿って高密度磁束 ϕ を生成する．高密度磁束が交差したコイル

中央部上方の可動薄板内に，磁束の浸透を妨げるように，渦電流（ \odot ）がコイル電流と逆方向に流れる．ファラデーの法則とオーム則およびフレミングの左手則より，可動薄板の渦電流密度 i ，単位体積あたりの電磁力 f は式(1)および式(2)で与えられる^{7)~9)}．

$$\text{rot } i = -\kappa (\partial B / \partial t) \quad (1)$$

$$f = i \times B \quad (2)$$

κ および B は可動薄板の導電率および磁束密度である．電磁力 f の作用により，コイル中央部上方の可動薄板は間隙内を半円筒状に高速変形し，図2(a)に示されるように，頭頂部は速度 v で固定薄板に衝突する．変形断面は下に凹，上に凸で， z 軸対称である．2枚の薄板接触面間の衝突角度が 0° なので，接合に至らない．最初の衝突後，可動薄板が z 方向への変形を制限されるため，図2(b)のように，衝突点はコイル幅方向（ x 方向）で2つに分かれる．可動薄板の未衝突部は xz 方向に高速変形しながら，衝突角度を連続的に増しながら固定薄板に斜め衝突する．斜め衝突の過程で，金属ジェットが衝突面から排出されるために衝突面は清浄化され，衝撃力と衝突直後から連続的に加わる電磁力によって密着され，2枚の薄板は y 方向に沿って2本の線状にシーム接合される．

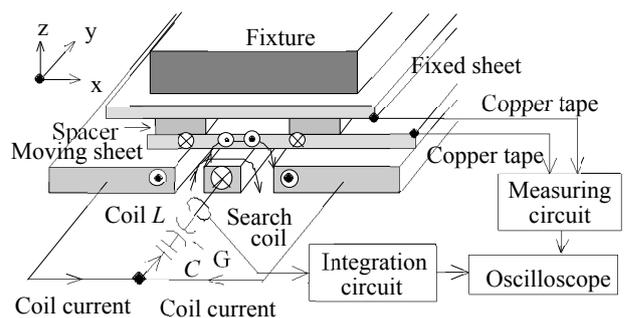


図1 電磁圧接の原理図

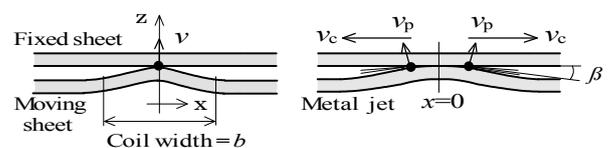


図2 可動薄板の変形

3. 実験方法

3.1 実験装置と供試材

実験装置の概要を図3に示す。図3(a)はE字形の圧接コイルの平面図、図3(b)は実験装置の断面図である。図3(a)のE字形コイルは、二つの隙間 d によって細長い中央直線部と広い両側部に分けられている。コイル幅 b は5mm、板厚 c は3mm、コイル中央の直線部長さ(シーム長さ) a は80mmである。圧接は中央直線部の上面で行われる。図3(b)で、可動薄板と固定薄板は、2つのスペーサで z 方向に間隙を設けられてコイル上面に置かれる。スペーサ間の x 方向空隙長は、可動薄板の変形を妨げないように、約40mmに設定される。電気的な絶縁のため、0.1mm厚のポリイミドフィルムが薄板外側に置かれ、固定具とコイル間の全体はシャコ万力で図3(a)の y 方向に沿って2箇所固定される。したがって、可動薄板とコイル間および固定薄板と固定具間はフィルムを介して密着しており、2枚の薄板は $\pm z$ 方向に拘束される。間隙長は0~5.17mmまで変えられる。可動薄板はA1050-H24、A6061-T6のアルミニウム薄板、固定薄板はSPCC低炭素鋼板で、寸法は幅100mm、長さ(シーム圧接長)80mm、板厚は1.0mmである。

図3(b)で、コンデンサ電源 C -放電ギャップスイッチ G -コイル L は放電回路を構成し、電源容量は400 μ F、放電エネルギーは2.0kJである。放電電流はログスキーコイルで検出される。放電電流がコイル L の両側部(◎)から中央直線部(⊗)に集中して流れるため、中央直線部の y 方向電流密度は大きくなる。矢印の高密度磁束が周辺に生成され、電気的に密に結合している可動薄板に交差するため、逆方向の渦電流(⊙)が可動薄板に流れる。渦電流と磁束で生じる電磁力により、可動薄板は上向きの z 方向に半円筒状に高速変形され、固定薄板に連続衝突し、接合に至る。

準静的な引張試験で得られたJIS13号B形状供試材の材料特性などをTable 1に示す。

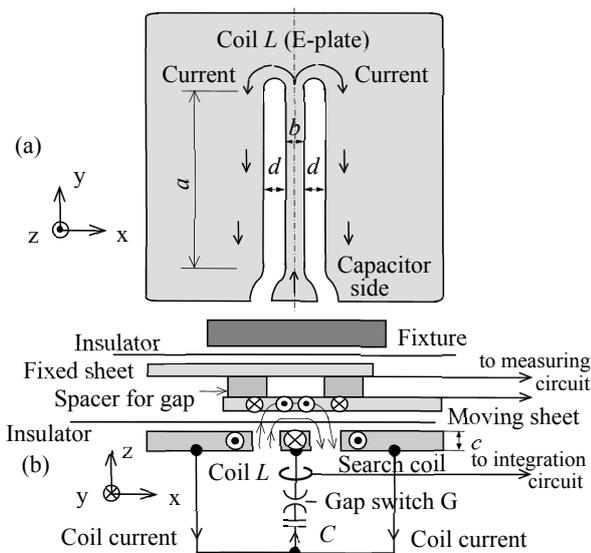


図3 実験装置構成

(a) 平板状ワンターンコイル平面図 (b) 実験装置断面

表1 供試材の特性

Material	Tensile strength /MPa	0.2% proof stress /MPa	Hardness HV _{0.5}	% Conductivity
A1050-H24	123	110	43	58
A6061-T6	305	280	115	43
SPCC	283	167	105	13

3.2 放電電流と衝突信号の測定

可動薄板の変形は、放電電流がコイルに流れてから始まる。そのため、電磁厚保節減賞の時間基準は放電電流の立ち上がり時刻である。可動薄板が図2(b)の変形形状における衝突時間信号を放電電流と同時測定すれば、最初の衝突時間は2つの波形の立ち上がり時刻の差で求められる^{2), 3), 9)}。

衝突時間信号は、固定薄板をピンとするピンコンタクト法で検出され、オシロスコープに記録される。この電気的な測定法は連続時間測定法であり、安価である。

図1に衝突時間測定法を示す。固定薄板と可動薄板に銅テープを貼り、これを信号検出端子とする。可動薄板に誘導された誘導起電力が固定薄板に接触すると、ピンコンタクト法におけるピンが接触する効果(スイッチオン)が生じ、電気信号が発生する。測定回路を通してオシロスコープに信号を取り込むことで、放電電流と同時測定が可能となる。放電電流の立ち上がり時間と上述の電気信号の立ち上がり時間の差を最初の衝突時間として測定する。

3.3 異種圧接板の接合強さの測定

採取された異種圧接板の平面図と分割を図4に示す。引張せん断試験のため、圧接板を約10mm幅でシーム方向(y 方向)と垂直に7等分して分割試験片を採取した。分割片番号(No.)はコンデンサ側から1, 2, ..., 7とする。No.3~No.5の中央3片を長手方向に引張せん断試験し、3片の最大荷重を求める。平均値をせん断荷重とし、接合強さを評価する。

4. 実験結果と考察

4.1 異種圧接板の接合強さ

異種圧接板の接合強さと間隙長の関係を図5に示す。白抜き印○および◇は、2つのアルミニウム可動薄板に対する圧接板の最大荷重を示し、かつ可動薄板が破断する。塗りつぶし印●および◆は、未接合もしくは切断中に剥離で

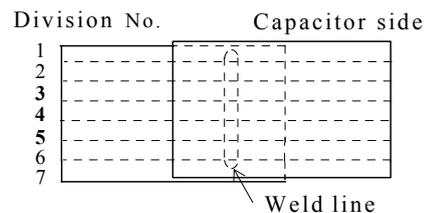


図4 圧接板の分割

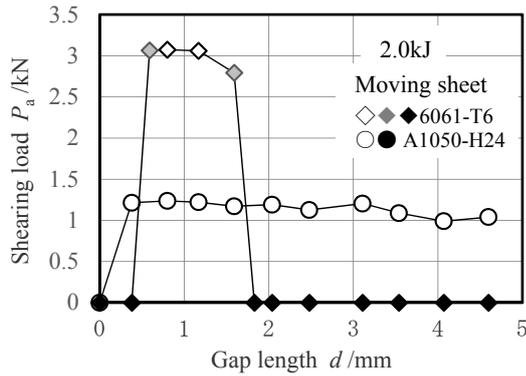


図5 間隙長に対する接合の可否，接合強さの関係

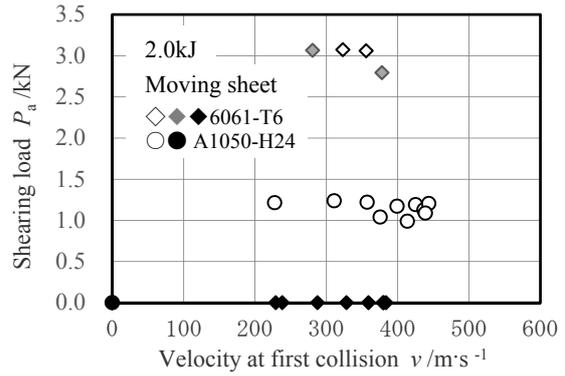


図7 接合強さと最初の衝突速度の関係

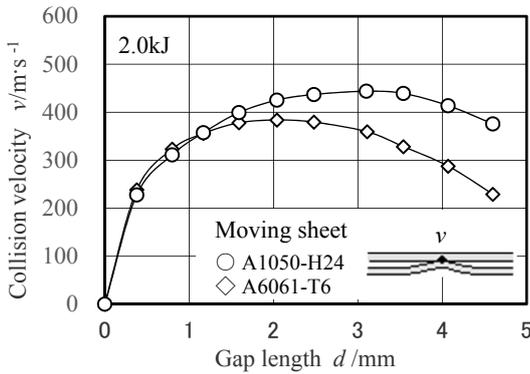


図6 最初の衝突時間と間隙長の関係

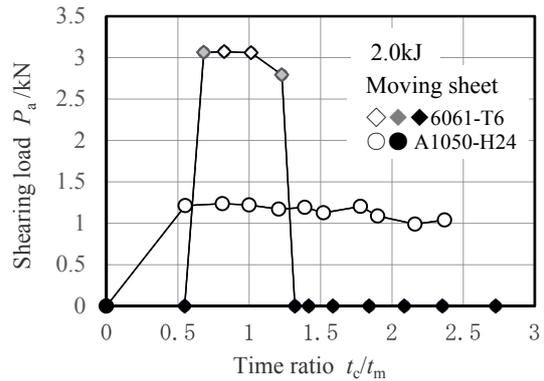


図8 接合強さと時間比 (t_c/t_m) の関係

ある。塗りつぶし◆は3片が接合面剥離である。

間隙長 0mm は2枚の薄板を密着させた圧接であり，未接合である。可動薄板が A1050-H24 の圧接板は，純アルミニウム薄板同士と純銅薄板同士の同種金属の圧接板と同様に，0.38mm 以上の間隙長で薄板破断である。しかし，可動薄板が A6061-T6 の圧接板は，◇の薄板破断の間隙長は 0.80~1.17mm であり，接合可能な間隙長範囲は大変狭い。

図6は可動薄板の衝突速度 v と間隙長 d の関係を示している。衝突速度 v は間隙長 0mm で 0m/s であるが，間隙長 0.38mm で 220m/s を超え，最大値に達した後に低くなる。 v は d が 1.59mm 位までほぼ等しく， d が大きくなると違いが現れる。最大速度は A1050-H24 板の 444 m/s であり， $d=3.10$ mm で現れる。

図7は，異種圧接板の接合強さ P_a と最初の衝突速度 v の関係を示している。 P_a は図5の， v は図6の数値である。A1050-H24 可動薄板の P_a は $v = 225$ m/s を境に，未接合と接合の2領域に分けられる。これは純アルミニウム薄板同士の圧接と同様の結果である。しかし，A6061-T6 可動薄板の P_a は v によって分けられず，接合可能な間隙長範囲は大変狭い。また，3片の薄板破断を生じる最初の衝突速度 v は 320m/s であり，A1050-H24 薄板のそれに比べて高くなる。したがって，異種圧接板の接合には，材料特性値が関係していると考えられる。

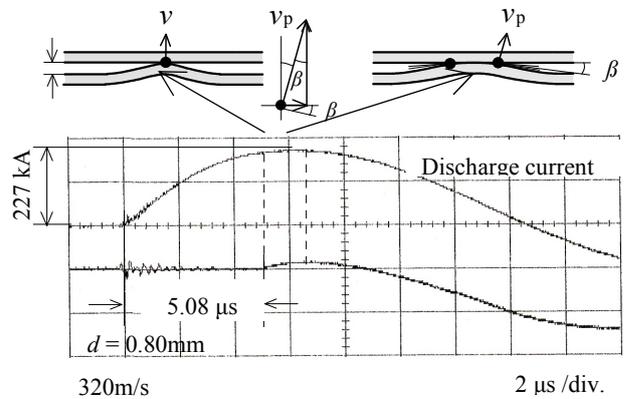


図9 放電電流と可動薄板の形状の関係

4・2 異種圧接板の接合強さと接合要因

接合強さ P_a に及ぼす時間比 t_c/t_m の影響を図8に示す。 $t_c/t_m = 1$ は最初の衝突が図9の放電電流の最大値で生じる。A1050-H24 可動薄板の圧接板は $t_c/t_m > 0.5$ で薄板破断する。A6061-T6 可動薄板の圧接板は $0.82 \leq t_c/t_m \leq 1.01$ で A6061-T6 か SPCC が薄板破断する。間隙長が 1.6mm 未満および $t_c/t_m < 1.01$ で，2つの可動薄板の衝突速度および衝突時間の相違は非常に小さい。接合の可否は，最初の衝突後の斜め衝突における衝突面の材料特性値にある。Al/Fe の接合要因は衝突速度と衝突時間に加え，可動薄板の硬さであると考えられる。

図9は薄板破断時の放電電流と可動薄板の変形形状の関係を示している。可動薄板はA6061-T6で、間隙長 $d=0.80\text{mm}$ の波形である。放電電流の最大値 I_m とその時間 t_m は 227kA と $6.16\mu\text{s}$ 、衝突時間 t_c は $5.08\mu\text{s}$ 、 $t_c/t_m=0.82$ である。 v は 320m/s である。最初の衝突後から約 $1\mu\text{s}$ の期間、連続的に生じる角度 β の斜め衝突で、衝突面は v_p による衝撃力、および放電電流の2乗に比例する大きな電磁力を v_p の方向に連続的に受け、塑性流動する。斜め衝突の終了後から約 $4\mu\text{s}$ の期間、接合面は大きな電磁力によって加圧され、Al/Fe異種圧接板は強い接合に至る。

5. 金属薄板の加熱による電磁圧接装置の検討

5.1 電磁圧接装置への誘導加熱システムの組み込み

上述までの実験結果より、A6061-T6/SPCCの接合においては接合条件が非常に限られており、接合条件設定が困難となる。放電エネルギーを大きくすることにより、条件は緩和されることが考えられるが、引張り強さ、耐力、硬さともに大きな薄板であればあるほど接合が困難になることが予想される。そこで、金属を加熱し、軟化させた状態で圧接することにより、放電エネルギーを抑制しつつ接合を可能にするシステムを導入する。加熱システムは、温度制御性がよく、接合部のみ効率よく加熱されるのが望ましい。そこで、電磁誘導加熱(IH)を用いて金属薄板の加熱を行う。

図10に電磁圧接装置へのIH用コイルの組み込み方法を示す。図10上図は図3における固定薄板上部の装置断面図、図10下図は上部から見た平面図である。加熱用コイルは直径 5mm のリッツ線を4層8巻で構成されている。加熱コイル上部には磁気抵抗を下げるため 5mm 厚のフェライト板を挿入し、金属薄板に効率よく磁束を通す工夫をしている。磁路をこれを接合部を固定する役割を果たすSKD材②の周りに挿入する。加熱用コイルの周辺は絶縁物であるガラスエポキシ材②~⑦で覆い、上からSUS304①で押さえ、平板状ワ

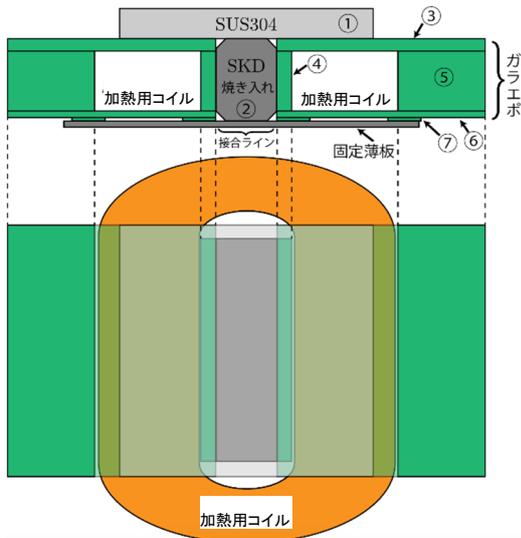


図10 誘導加熱用コイルの組み込み

ンターンコイル(圧接コイル)からシヤコ万力までしっかり固定される。

加熱用コイルは、インバータによって高周波交流電流が供給される。インバータの入力は 200V 、出力周波数 20kHz で定格出力 5kW で設計した。また、インバータを動作させた状態で圧接することが可能である。

5.2 金属薄板の加熱特性

可動薄板A6061-T6、固定薄板SPCCとして、電磁圧接装置にセットして電磁誘導加熱にて加熱し、そのときの金属薄板の温度特性を示す。図11に温度測定箇所を示す。①は接合部の固定薄板の温度、②は接合部の可動薄板の温度、③はSKD材で接合部を押さええている箇所の固定薄板の温度である。尚、温度は熱電対により測定された。

図12に温度特性を示す。①は 300°C 以上、加熱することができるが、同じ固定薄板の温度でも③は 150°C に満たない。これは、SKD材が熱を吸収し、これ以上固定薄板の温度が上昇できない状況にあることがわかる。また、②については 100°C にさえ到達できない。この原因として、可動薄板は誘導加熱では加熱が難しいアルミニウム合金であること、かつ、加熱用コイルからの距離が固定薄板に比べて大きいことによる。加熱時間を延ばすことによってさらに温度を上昇させることも可能であるが、金属薄板と接触するガラスエポキシ板の耐熱温度に限界があるため、加熱を中断せざるを得ない。それ故、加熱装置としては課題が残る結果となった。

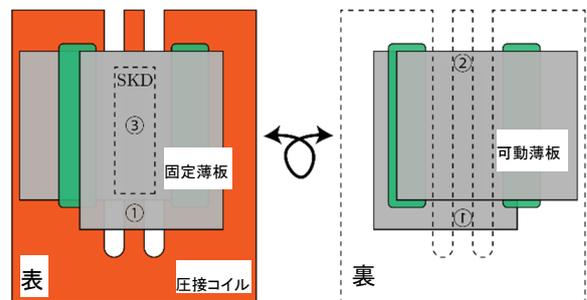


図11 金属薄板の温度測定箇所

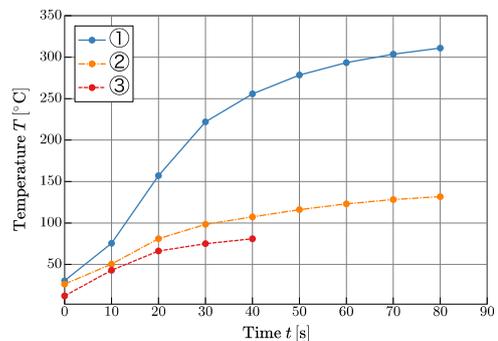


図12 金属薄板の温度特性

6. まとめ

2種類のアリミニウム薄板と低炭素鋼板への電磁圧接で、放電エネルギー2.0kJ 固定における衝突時間と採取した圧接板の接合強さを調べ、異種圧接板の接合性に影響を及ぼす因子を検討した。A1050-H24では、異種材料でも容易に接合することが可能であるが、A6061-T6は、接合は可能であるがその条件範囲が狭くなるといえる。それ故、適切な放電エネルギーと間隙長を選択することが求められる。

また、その条件範囲を広げるため、金属薄板を加熱することができる電磁圧接装置を検討した。しかし、装置への組み込みの制約上、接合部に均一に、かつ高温に温度を上昇させることが難しいことが明らかになった。装置の構成にさらなる工夫が必要である。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団一般研究開発助成(AF-2016022)より行われました。同財団からの研究助成に対し厚く謝意を表します。また、本研究は都立産業技術高等専門学校岡川啓悟名誉教授との共同研究によって行われました。

参考文献

- 1) Aizawa, T. : J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 44-512 (2003), 957-959.
- 2) Okagawa, K. & Aizawa, T. : J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 47-546 (2006), 632-636.
- 3) Ishibashi, M., Okagawa, K. & Kabasawa, E. : J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 57-664 (2016), 457-461.
- 4) Aizawa, T., Kashani, M. & Okagawa, K. : WELDING JOURNAL, 86 (2007), II 9-s-124-s.
- 5) Shimoda, S., Komati, T., Okagawa, K. & Hirohashi, M. : Proc. 2011 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (2011), 293-294.
- 6) Iseki, w., Morimoto, K., Itoi, T. & Okagawa, K. : Proc. 2014 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (2014), 193-194.
- 7) Okagawa, K., Ishibashi, M. & Kabasawa, E. : Proc. 2016 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (2016), 341-342.
- 8) Ishibashi, M., Okagawa, K. & Kabasawa, E. : Proc. 67th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast., (2016), 205-206.
- 9) Okagawa, K., Ishibashi, M., & Kabasawa, E. : Proc. 67th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast., (2016), 207-208.