



# 加圧力可変抵抗スポット溶接機を用いたアルミニウム 合金AA6022-T4 の溶接部の評価

古川 一敏\*, 加藤 光昭\*\*, 西尾 一政\*\*  
山口 富子\*\*, 永田福太郎\*\*

## Evaluation of Welds of Aluminum Alloy AA6022-T4 Welded using Electrode Force Changeable Resistance Spot Welding Machine

Kazutoshi Furukawa\*, Mitsuaki Katoh\*\*, Kazumasa Nishio\*\*,  
Tomiko Yamaguchi\*\*, Fukutaro Nagata\*\*

Resistance spot welding has been widely used in the field of automobile industry. The authors have developed a resistance spot welding machine by which electrode force can be easily changed during welding time. We studied the influence of electrode force (base electrode force  $P_0$ , primary electrode force  $P_1$  and secondary electrode force  $P_2$ ) and welding current  $I$  in spot welding on the properties of welds of aluminum alloy AA6022-T4 which is used in the automobile industry. We changed welding current and electrode force, and monitored temporal changes of electrode forces during the welding. Shapes of the temporal changes of electrode force monitored were classified in three kinds and these lead to the changes of the maximum tensile shear load  $F_{max}$  of welds. Though some solidification cracks were observed in the thickness direction of specimens when welding currents and electrode forces were high, these did not affect the maximum tensile shear loads because sufficiently large nuggets were developed. Solidification cracks parallel to the specimen surface, however, lead to the decrease in  $F_{max}$ . The results by regression analysis of the influence of  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  and  $I$  on  $F_{max}$  showed that  $F_{max}$  increased with the increase in  $P_1$  when  $P_0 = 2450$  N but increased with the decrease in  $P_1$  when  $P_0 = 3000$  and  $3430$  N for the same welding current, and no influence of  $P_2$ .

*Key words:* Electrode force changeable resistance spot welding machine, Aluminum alloy AA6022, Temporal change of electrode force, Maximum tensile shear load, SEM

### 1. 緒 言

抵抗スポット溶接(以下, スポット溶接という)は, 自動車産業を中心に産業界において広範囲に

使用されている。一般に, スポット溶接においては, 初期に設定された一定の加圧力のもとで, 一定の溶接電流を一定時間通電することによって溶接が行われている<sup>1)</sup>。ところが, 加圧通電後の温度上昇, 膨張, 軟化, 変態, 溶融, 通電停止後の凝固, 冷却及び収縮に伴って実際の溶融部の加圧力は刻々と変化している<sup>2)</sup>。著者らは, 通電中に

\* 愛知産業株式会社 Aichisangyo Co.Ltd.

\*\* 九州工業大学 Kyushu Institute of Technology  
原稿受付 2006年6月12日

瞬時に加圧力を変化できる機構を組み込んだ重ね抵抗用溶接機を開発した。この溶接機を用いて、冷間圧延鋼板 SPCC に対してスポット溶接を行ったところ、通電中に基本加圧力よりも加圧力を低下させることによって、良好なナゲットを形成させることができ、これに伴って良好なスポット溶接継手の最大引張せん断荷重も得られることを明らかにした<sup>3)</sup>。

そこで、本研究では、材料として乗用車に用いられているアルミニウム合金 AA6022-T4 を取り上げ、種々の条件でスポット溶接し、溶接中に加圧力を変化させて、これが溶接部の特性に及ぼす影響について、従来の溶接法による結果と比較検討した。また、溶接部の引張せん断試験を行い、溶接条件と最大引張せん断荷重の関係について検討した。さらに、引張せん断試験で得られたデータと溶接条件との関係を明らかにするため、重回帰分析を行って検討した。そして、これらの結果を、ナゲットのマクロ組織及び破断面の SEM 組織を観察して考察した。

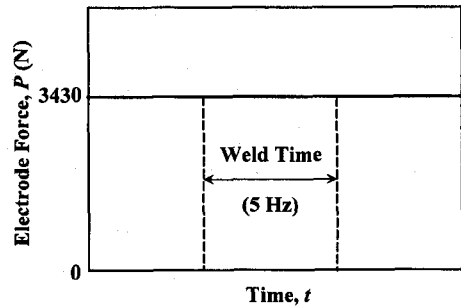
## 2. 実験方法

使用材料は、アルミニウム合金 6000 系の AA6022-T4 (Si: 1.07, Fe: 0.14, Cu: 0.01, Mn: 0.07, Mg: 0.57, Al: 残部 (mass%)) である。また、材料の引張強さ: 230 MPa, 耐力: 133 MPa, そして伸び: 29% である。試験体の寸法は板厚 1.2 mm × 幅 50 mm × 長さ 100 mm のものを用い、これに対して重ね代を 50 mm として、その中央にスポット溶接を行った。

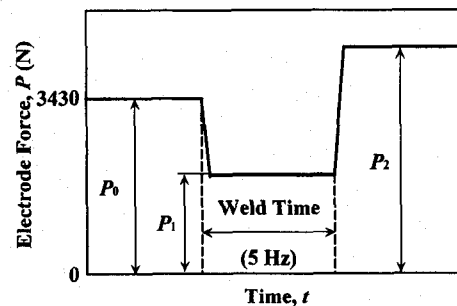
溶接条件は、次のように設定した。まず、溶接電流 (交流)  $I$  は、18~30 kA の範囲で 2 kA ずつ変化させた。基本加圧力  $P_0$  は、溶接中にこれを変化させない従来法に対して 1270~3430 N の範囲で検討を行った結果、最も大きな最大引張せん断荷重が得られた 2450 N に対してまず検討した。この場合には加圧力を低減させた効果が認められなかったため、3000 及び 3450 N に対しても検討した (スポット溶接においては散りの発生が問題となるが、従来法においても本実験の条件では散りの発生はなく、一次加圧力を変化させた場合にも同様であった)。加圧力は、通電前の加圧

力を基本加圧力  $P_0$  (N), 通電開始時に変化させる加圧力を一次加圧力  $P_1$  (%) とし、基本加圧力を基準として % で表示した。また、通電終了後の加圧力を二次加圧力  $P_2$  (%) とし、一次加圧力と同様に基本加圧力を基準に表示した。溶接時間は全て 5 Hz とした。溶接条件の表示方法は溶接電流、基本加圧力、一次加圧力及び二次加圧力の順とし、例えば溶接電流 18 kA, 基本加圧力 3450 N, 一次加圧力 100% 及び二次加圧力 100% の際の表示方法は 18-3450-100-100 となる。

本実験で使用した溶接機は、溶接中の加圧力の変化をディスプレイ上に表示が可能である。加圧力を一定とする従来の方法と、本研究での設定加圧力の形状を模式的に Fig. 1(a) 及び (b) に示す。 $P_1$  は、40, 45, 50, 55, 60, 65, 80 及び 100% と変化させた。また、 $P_2$  は、100, 120 及び 140% と変化させた。また、電極の寸法は、直径が 12 mm で先端半径が 100 mm であり、材質はクロム-ジルコ



(a) Constant electrode force



(b) Varying electrode force

Fig. 1 Schematic illustration of temporal changes of electrode force

ニウム銅のものを用いた。

種々の条件でスポット溶接したナゲットのマクロ組織及びミクロ組織の観察を行った。腐食液にはケラー液（蒸留水：50 mL，HCl：15 mL，HNO<sub>3</sub>：25 mL，HF：10 mL）を用いた。腐食時間はマクロ組織の観察を行う際は約7分間、そしてミクロ組織の観察を行う際は約1分間とした。

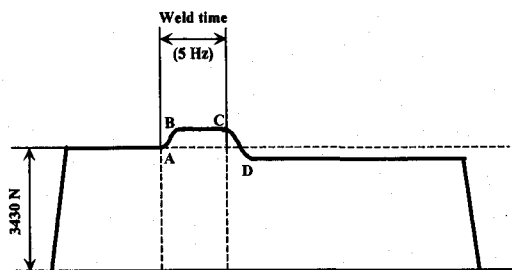
溶接継手の引張せん断荷重を評価するために、スポット溶接後の溶接部に対して引張せん断試験を行い、最大引張せん断荷重を測定した。各溶接条件において、3本ずつ実験を行い、実験結果にはその平均値を用いた。

### 3. 加圧力の時間的変化とそれに及ぼす溶接条件の影響

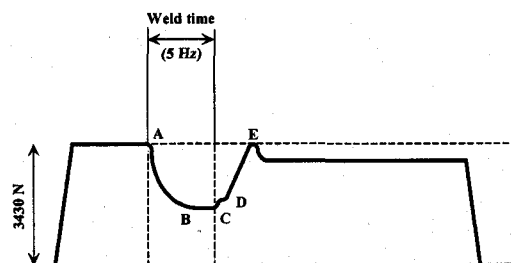
加圧力の設定に際しては、通電をしない状態で所定の条件になるようにロードセルを用いて加圧力を調節して設定したが、溶接中及び溶接後の材料の挙動（加熱に伴う膨張，溶融に伴う変形抵抗の減少，及び冷却に伴う収縮）によってディスプレイ上の加圧力は種々変化することが観察された。本研究で得られた加圧力の時間変化は各溶接条件によって種々変化したが、Fig. 2(a), (b)及び(c)に示す3種類に大別することができた。それぞれを、タイプI、II及びIIIと表示する。ここでは、基準加圧力を  $P_0 = 3430$  Nとした場合を示した。

まず、Fig. 2(a)に示したタイプIにおいては、加圧力は通電開始後にABのように増加し始め（これは、通電することによって材料が加熱され、膨張することに起因している）、その後は、BCのようにほぼ一定の値を保ち（これはナゲット部が溶融することによって軟化することに起因している。溶接電流を増大させると、加圧力は減少する傾向を示した）、そしてCDのように減少する（これは、通電を停止するとともに材料が冷却され、収縮することに起因している）。

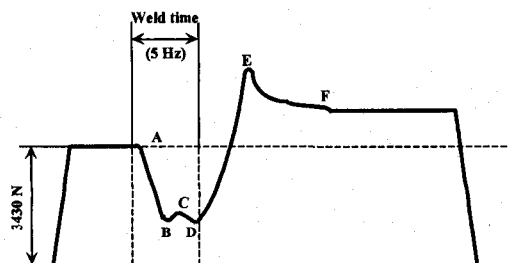
Fig. 2(b)に示したタイプIIにおいては、加圧力は通電開始後にABのように急激に減少し始め（これは、 $P_1$ を減少させたことに起因している）、極小値をとった後にBCのように材料の軟化に起因してほぼ一定の値をとり、通電を停止す



(a) Type I (18-3430-100-100)



(b) Type II (30-3430-50-100)



(c) Type III (30-3430-45-140)

Fig. 2 Examples of temporal changes of electrode force

るとともに増加する（これは、 $P_2$ が $P_1$ よりも大きくなることに起因している）が、基本加圧力よりは大きくならず極大値をとり、その後減少して一定値に達する（これは、材料が収縮することに起因している）。

Fig. 2(c)に示したタイプIIIにおいては、加圧力は通電開始後にABのように急激に減少し（ここまでの変化は、タイプIIの場合と同様である）、極小値をとった後にBCのように少し増加し（これは、材料の膨張に起因するが、設定した

加圧力及び材料の硬さとの兼ね合いによってこの現象は変化する), 通電終了後にDEのように増加を始め, 基本加圧力より大きな極大値をとった(これは,  $P_2$ が $P_0$ よりも大きいことに起因している)後に, 材料の収縮に伴ってEFのように減少する。

次に, 各タイプの加圧力の時間的変化に及ぼす溶接条件の影響を検討した。スポット溶接などの抵抗溶接では, 材料の抵抗発熱を利用しているため, 加圧力を小さく設定して接触面の抵抗を増大させると, 発熱量が大きくなり, 良好な溶接部が得られると考えられる。

### 3.1 タイプIの特徴

タイプIは, 主に従来方式である加圧力を一定とする溶接条件において多く認められた。Fig. 3に, 30-3430-100-100の場合の加圧力の時間的変化を示す。Fig. 2(a)の場合と比べて溶接電流が大きいこと, 通電によってABのように増大した後, ナゲット部近傍の軟化によって加圧力はBCDのように次第に減少する。通電を停止すると凝固が始まるため, 材料が硬化することによって加圧力はDEのようにいったん増大する(この現象は, BCDのように次第に加圧力が減少した $I=26$  kA以上の場合に認められ,  $I=24$  kA以下の場合には認められなかった。これは, 溶接電流が小さい場合には材料が溶融中の軟化の程度が小さいことに起因している)。しかし, 全体としては収縮するため, 加圧力はEFGのように次第に減少する。

また, タイプIは, 一次加圧力と二次加圧力が

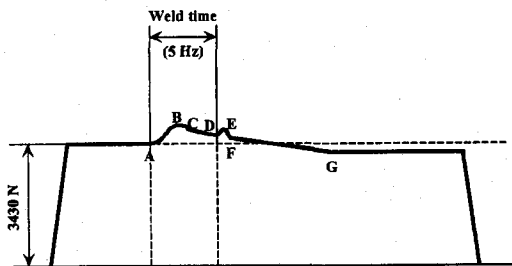
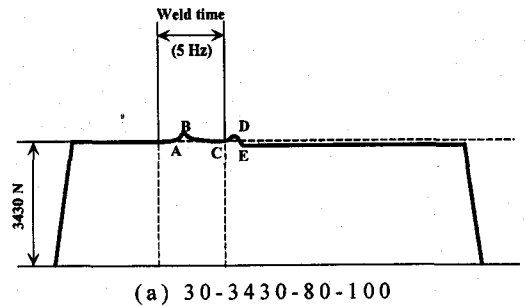


Fig. 3 Temporal change of electrode force for the Type I (Constant electrode force, 30-3430-100-100)

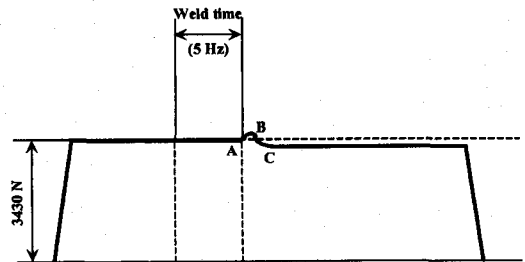
基本加圧力に近い $P_1=80$ 及び65%の場合にも多く認められた。Fig. 4(a)及び(b)に, 溶接条件がそれぞれ30-3430-80-100及び30-3430-65-100の場合の加圧力の時間的変化を示す。 $P_1=80\%$ としたFig. 4(a)においては, 通電中に加圧力を基本加圧力よりも少し減少させたため, Fig. 2(a)及び3に認められた通電中の加圧力の増大はほとんど認められなかった。更に $P_1=65\%$ と減少させたFig. 4(b)においても同様の現象が認められた。 $P_1$ を減少させることによって加圧力の低下が認められたのは, 次に述べるように $P_1$ を55%以下にした場合である。

### 3.2 タイプIIの特徴

タイプIIは,  $P_1$ を55%以下にした場合に認められた。Fig. 5(a)及び(b)に, 溶接条件がそれぞれ30-3430-55-100及び30-3430-45-100の場合の加圧力の時間的変化を示す。 $P_1=55\%$ としたFig. 5(a)においては, 通電を開始するとともに加圧力

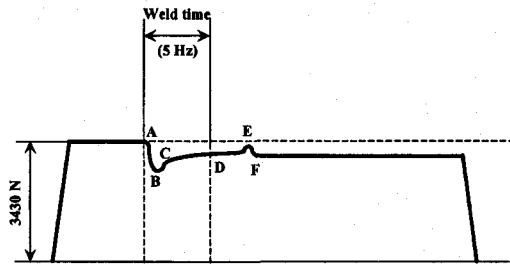


(a) 30-3430-80-100

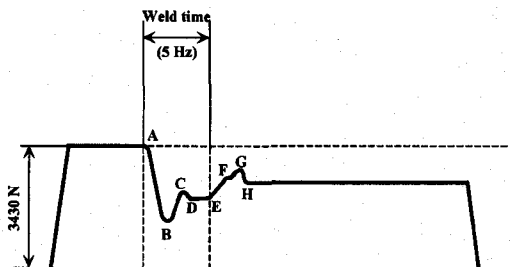


(b) 30-3430-65-100

Fig. 4 Temporal change of electrode force for Type I when changed first and second electrode force (Varying electrode force)



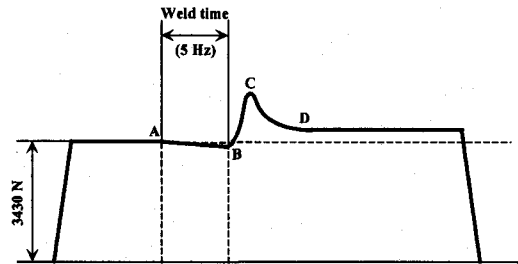
(a) 30-3430-55-100



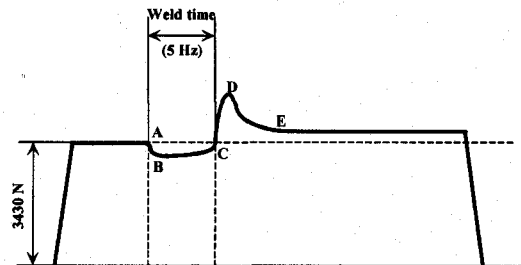
(b) 30-3430-45-100

Fig. 5 Temporal change of electrode force for Type II (Varying electrode force)

はABのように減少するが、Fig. 2(b)に示した $P_1=50\%$ の場合と比較すると、加圧力の減少の程度は小さい。その後は、材料の膨張に伴ってBCDのように加圧力は緩やかに増大する（これは、 $P_1$ の減少に伴う加圧力の減少の程度が小さいことに起因している）。この傾向は、DEのように通電を停止後も続き、Eで極大値をとった後、材料の収縮に伴ってEFと加圧力は減少する。また、 $P_1=45\%$ としたFig. 5(b)においては、加圧力は複雑に変化している。通電を開始するとともに加圧力はABのように減少するが、Fig. 2(b)に示した $P_1=50\%$ の場合と比較すると、加圧力の減少の程度は大きくなる。これは、 $P_1$ の減少に起因している。その後は、材料の膨張に起因してBCのように加圧力は増大するが、 $P_1$ の減少に起因して溶接部の接触抵抗が増大することによって溶接入熱が増大するため、硬さが減少し、材料の変形抵抗が減少する。このため、CDのように加圧力は減少する。通電を停止して



(a) 30-3430-65-140



(b) 30-3430-55-140

Fig. 6 Temporal changes of electrode force for Type III (Varying electrode force)

$P_2=100\%$ とすることによってEFGのように加圧力は増大する。その後は、材料の収縮に起因してGHのように加圧力は減少する。

### 3.3 タイプⅢの特徴

タイプⅢは、 $P_2$ を $P_0$ よりも大きくした場合に認められた。 $P_1=45\%$ の場合には、Fig. 2(c)に示したように、通電を開始するとともに加圧力は急激に減少し、通電を停止して二次加圧力を基準加圧力よりも大きくしたため、加圧力は急激に増大した。しかし、一次加圧力を増大させると、これらの変化は小さくなる傾向が認められた。その例として、Fig. 6(a)及び(b)に、それぞれ30-3430-65-140及び30-3430-55-140の場合を示す。

Fig. 6(a)に示した $P_2=65\%$ の場合には、Fig. 4(b)に示した場合と同様に、通電中の加圧力の変化はほとんど認められなかった。しかし、Fig. 6(b)に示した $P_2=55\%$ の場合には、通電中に加圧力は少し減少した。そして、いずれの場合にも通電後には加圧力は基準加圧力よりも増大した。

以上述べたように、まず、従来用いられてきた

スポット溶接中に加圧力を一定に設定した場合にも、実際の加圧力は経過時間とともに変化することを明らかにした。次に、一次加圧力及び二次加圧力を変化させると、 $P_1$ が55%を超える場合には基準加圧力とほとんど変化は認められなかったが、それ以下になると $P_1$ の低下とともに加圧力は大きく低下し、材料の膨張・収縮に伴って複雑に変化することを明らかにした。

#### 4. 最大引張せん断荷重に対する検討

##### 4.1 溶接条件の影響

Fig. 7に、従来形の場合に対して、 $I=30$  kAと一定にして基準加圧力を種々変化させた際の最大引張せん断荷重 $F_{max}$ の変化を示す。データにはばらつきが認められるが、 $P_0=1274\sim 3038$  Nの範囲では2500 N前後の $F_{max}$ をもち、 $P_0=3430$  Nとなると $F_{max}$ は1000 Nと急激に減少した。

そこで、 $P_0=2450, 3000$ 及び $3430$  Nとして、 $F_{max}$ に及ぼす溶接電流の影響を検討した結果をFig. 8に示す。 $P_0=2450$ 及び $3000$  Nの場合には溶接電流が増大するとともに $F_{max}$ は増大する傾向が認められた。しかし、 $P_0=3430$  Nの場合にはデータがばらつき、 $F_{max}$ と溶接電流の間には相関は認められなかった。

次に、 $P_0=2450, 3000$ 及び $3430$  Nのそれぞれに対して、 $P_1$ 及び $P_2$ を変化させて種々の溶接電流でスポット溶接を行い、 $F_{max}$ に及ぼす影響を検討した。まず、 $P_0=2450$  Nの場合の結果を述べ

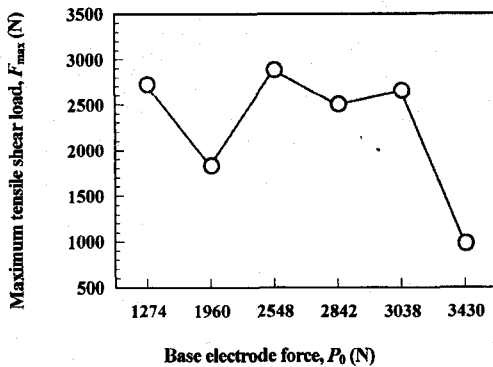


Fig. 7 Relation between the maximum tensile shear load and base electrode force (Constant electrode force,  $I=30$  kA)

る。

Fig. 9に、 $I=22$  kAにおける $F_{max}$ と $P_1$ の関係を示す。この際、 $P_2=100, 120$ 及び $140\%$ と変化させた。 $P_1=100\%$ においては $F_{max}=1800$  Nであり、 $P_1$ を40, 45及び50%と減少させた場合の $F_{max}$ はいずれもこの値より小さく、 $P_1$ を減少させた効果は認められなかった。

Fig. 10に、 $P_1=40\%$ における $F_{max}$ と $P_2$ の関係を示す。ここでは、 $I=22, 24$ 及び $26$  kAの場合の結果を示した。図から明らかなように、 $P_2$ を変化させても $F_{max}$ には大きな変化は認められなかった（この傾向は、他の $P_0$ においても同様で

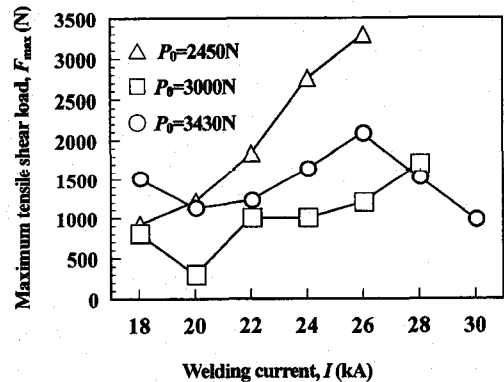


Fig. 8 Influence of base electrode force on the relation between the maximum tensile shear load and welding current (Constant electrode force)

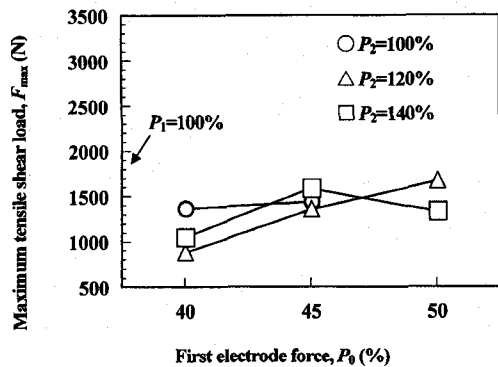


Fig. 9 Influence of second electrode force on the relation between the maximum tensile shear load and the first electrode force ( $P_0=2450$  N,  $I=22$  kA)

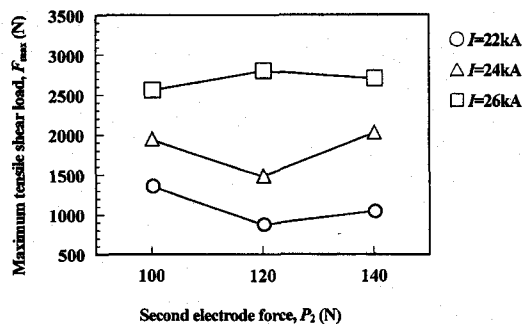


Fig. 10 Influence of welding current on the relation between the maximum tensile shear load and second electrode force ( $P_0=2450$  N,  $P_1=40\%$ )

あった)。一方、溶接電流の増大とともに  $F_{max}$  が増大しているのが認められる。

次に、 $P_0=3000$  Nにおける  $F_{max}$  と  $P_1$  の関係を Fig. 11に示す。この関係は、溶接電流の影響を受けることが認められた。すなわち、 $I=18, 20$  及び  $22$  kA の場合には、 $F_{max}$  に及ぼす  $P_1$  の効果はほとんど認められず、 $P_1=100\%$  の場合の値と大きな差異は認められなかった。しかし、 $I=24, 26$  及び  $28$  kA の場合には、 $P_1$  が減少するとともに  $F_{max}$  は増大した。また、同じ  $P_1$  においては、溶接電流が増大するとともに  $F_{max}$  は増大する傾向が認められた。

また、 $P_0=3430$  Nにおける  $F_{max}$  と  $P_1$  の関係を Fig. 12に示す ( $I=30$  kA)。  $P_2=100, 120$  及び  $140\%$  と変化させた結果を示したが、 $F_{max}$  に及ぼす  $P_2$  の影響は認められなかった。 Fig. 12には、 $F_{max}$  に及ぼす  $P_1$  の顕著な効果が認められる。すなわち、 $P_1=50$  及び  $45\%$  においては  $P_1=100\%$  における  $F_{max}$  と比べて2.5倍の大きな最大引張せん断荷重が得られた。

以上述べたように、 $F_{max}$  に対しては溶接条件が複雑に影響を及ぼす。そこで、 $P_0=2450, 3000$  及び  $3430$  Nのそれぞれの場合に対して、 $F_{max}$  を従属変数、そして  $P_1, P_2$  及び  $I$  を独立変数として重回帰分析を行った。得られた結果を式(1)、(2)及び(3)に示す。

$$P_0=2450 \text{ N: } F_{max} = -5420 + 290I + 0.422P_1 \quad (R=0.98) \quad (1)$$

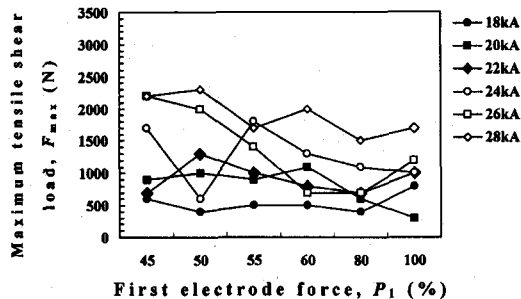


Fig. 11 Influence of welding current on the relation between the maximum tensile shear load and first electrode force

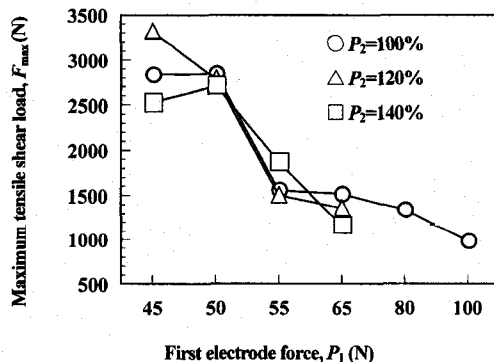


Fig. 12 Influence of second electrode force on the relation between the maximum tensile shear load and first electrode force ( $P_0=3430$  N,  $I=30$  kA)

$$P_0=3000 \text{ N: } F_{max} = -1290 + 127I - 0.253P_1 \quad (R=0.81) \quad (2)$$

$$P_0=3430 \text{ N: } F_{max} = 3960 - 0.937P_1 \quad (R=0.84) \quad (3)$$

$P_2$  は、いずれの場合にも有意でなかったため、除外した。また、 $P_0=3430$  Nの場合には  $I$  も有意でなかったため、除外した。

式(1)、(2)及び(3)から明らかのように、 $P_0=2450$  Nの場合には一次加圧力を減少させる効果は認められなかったが、 $P_0=3000$  及び  $3430$  Nにおいては認められた。

#### 4.2 組織観察

スポット溶接部の最大引張せん断荷重は、ナゲット直径が大きい方が大きくなる<sup>4)</sup>。しかし、ナゲット中に割れなどの溶接欠陥が存在すると、

この影響も受ける。そこで、ナゲットの断面マクロ組織を観察するとともに、引張せん断試験後の破断面のSEM観察を行った。

Fig. 13(a)~(d)に、 $I=30$  kA そして  $P_1=P_2=100\%$  とし、 $P_0=1274, 2548, 3038$  及び  $3430$  N と変化させたときのナゲットのマクロ組織をそれぞれ示す。 $I=30$  kA の場合には多くの条件で板厚方向に熱影響部にも達する割れが認められたが、Fig. 7 に示したように  $F_{max}$  は  $P_0=3430$  N の場合を除いて  $2500$  N 前後の大きな値をもっていたことから、この種の割れは  $F_{max}$  にはほとんど悪影響を及ぼさないといえる。これは凝固割れであるが、溶接継手の引張せん断試験を行った場合には次に示すようにせん断破壊をしたため、最大引張せん断荷重にはほとんど影響を及ぼさなかったと考えられる。

Fig. 14(a)~(c)に、30-2842-100-100の溶接条件の場合の破断面のSEM組織を示す。破断形態は、(c)から明らかなようにせん断破壊である。破断面には割れが認められるが、(e)に示した割れの拡大写真から明らかなように、典型的な凝固割れである。また、引張せん断荷重を受けても、割れの開口幅が特に拡大される現象は認められなかった。

一方、 $F_{max}$  が急激に減少した  $P_0=3430$  N の場

合には、マクロ組織には他の場合と比較しても大きな差異は認められなかった。そこで、破断面のSEM観察を行った結果を Fig. 15(a)~(e) に示す。破断形態は、(c)から明らかなように、せん断破壊である。A及びD領域は延性破壊をしている。しかし、B及びC領域には大きく開口した割れ及び溶融が十分でなかったと考えられる平坦な領域も認められた。これらが、 $F_{max}$  が小さかった原因と考えられる。

Fig. 16(a)~(d)に、それぞれ加圧力を一定 ( $P_0=2450$  N) として溶接電流を  $18, 20, 22$  及び  $26$  kA と変化させた際のナゲットのマクロ組織を示す。 $I=18$  kA の場合にはナゲット中にも未溶融の領域も認められ、ナゲットの形成は十分ではない。 $I=20$  kA になると明りょうなナゲットが形成されている。また、 $I=22$  及び  $26$  kA と増大するとともにナゲットの大きさは増大しているが、 $I=26$  kA においては板厚方向にいくつかの熱影響部に達する割れが認められた。すなわち、Fig. 8 に示したように、 $P_0=2450$  N の場合に溶接電流の増大とともに、 $F_{max}$  が増大したのは、ナゲットの大きさが増大したことに起因している。これと同様の傾向は、 $P_0=3000$  N の場合にも認められた。

一方、Fig. 17(a)及び(b)に、それぞれ  $22-3430$

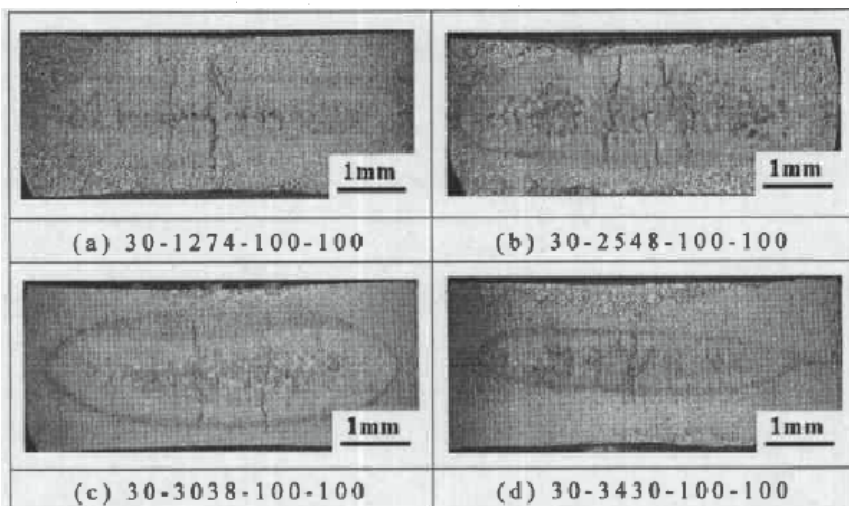


Fig. 13 Changes in macrostructures of welds when the base electrode force is changed for  $I=30$  kA and  $P_1=P_2=100\%$

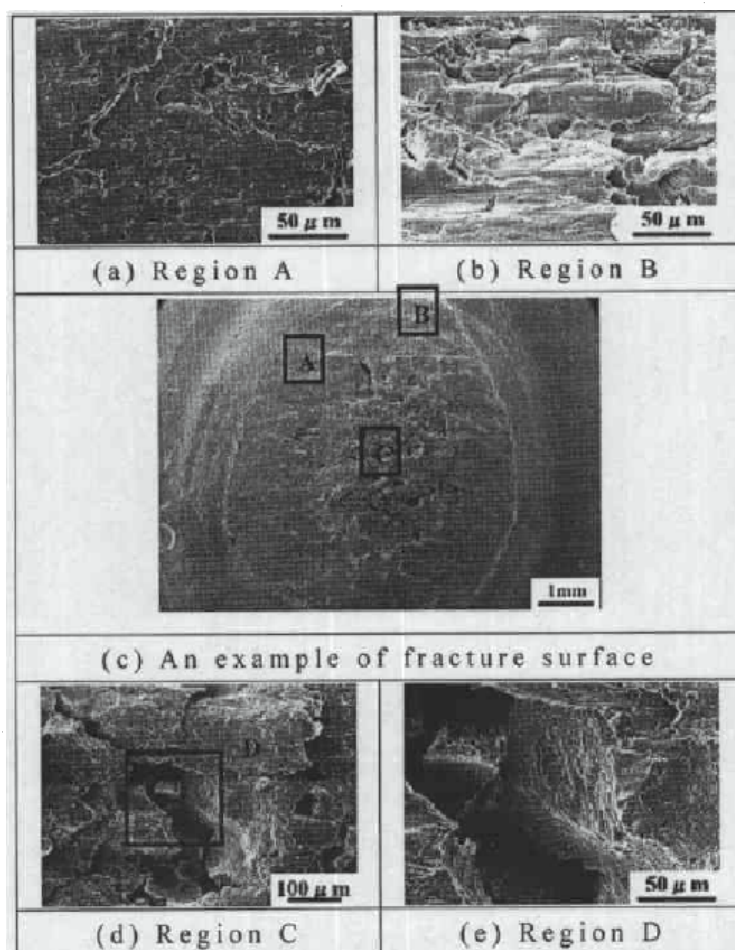


Fig. 14 SEM images on fracture surface of the weld in 30-2842-100-100

-100-100及び28-3430-100-100の場合のナゲットの macros 組織を示す。この場合にも、溶接電流が増大するとともにナゲットの大きさは増大したが、この場合の特徴は、多くの場合にナゲット中に割れが認められたことである。すでに述べたように、板厚方向の割れは  $F_{max}$  に影響を及ぼさなかったが、Fig. 8 に示した  $P_0=3430$  N の場合に、 $F_{max}$  と溶接電流の間に相関が認められなかったのは、Fig. 15 に示したような割れの存在量に起因すると考えられる。

Fig. 18(a)及び(b)に、それぞれ  $I=22$  kA,  $P_0=2450$  N として  $P_1=40\%$  として  $P_2=100, 120$  及び  $140\%$  とした際のナゲットの macros 組織を示す。Fig. 16(c) に示した  $P_1=P_2=100\%$  の場合と比較

すると明らかなように、 $P_1$  が減少すると、ナゲットの大きさが減少しているのが認められた。これが、Fig. 9 に示したように  $P_1=100\%$  の場合に比べて  $P_1$  を低下させた場合の方が  $F_{max}$  が減少した原因といえる。一方、 $P_2=100, 120$  及び  $140\%$  と変化させても  $F_{max}$  には大きな変化が認められなかったが、これは、ナゲットの macros 組織に大きな変化が認められなかったことと対応している。

Fig. 19 に、 $P_0=3000$  N として  $P_1=100\%$  と一定にして  $I=18, 22$  及び  $26$  kA と変化させた場合の、 $P_1=45$  及び  $100\%$  におけるナゲットの macros 組織を比較した結果を示す。 $I=20$  kA の場合には、両者の macros 組織に大きな変化は認められな

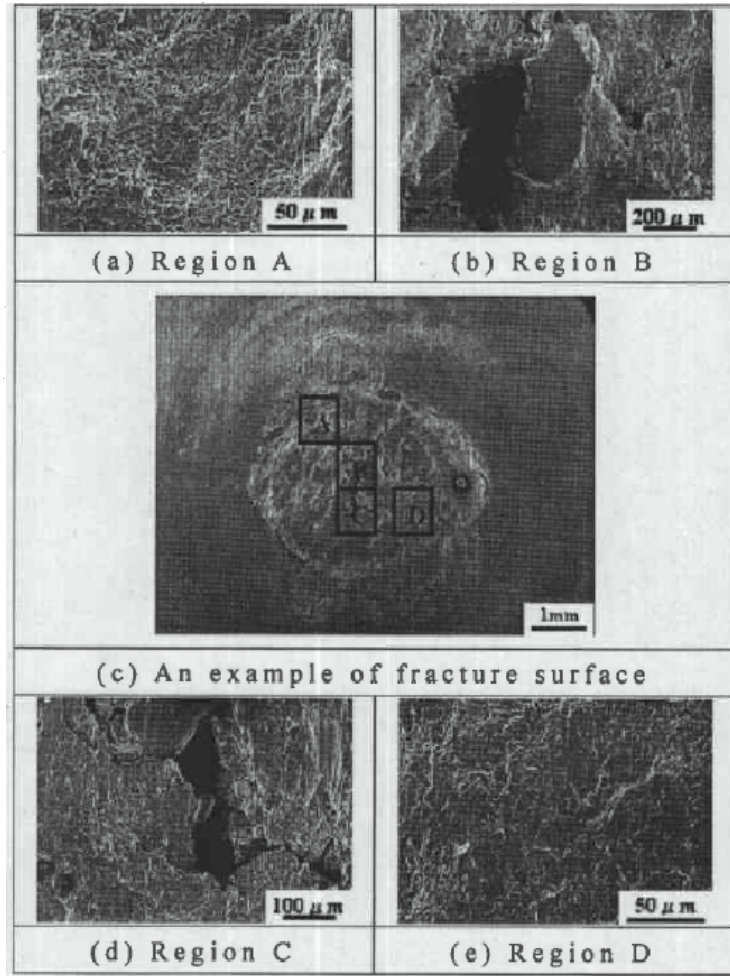


Fig. 15 SEM images on fracture surface of the weld in 30-3430-100-100

かったため、Fig. 11に示したように $P_1$ を変化させても $F_{max}$ には大きな変化が認められなかったと考えられる。一方、 $I=26$ 及び $28$  kAにおいては、 $P_1=45\%$ の場合には良好なナゲットが形成されたが、 $P_1=100\%$ の場合には板厚方向とともに表面に平行な割れも認められたため、溶接電流が大きな場合には $F_{max}$ に差異が認められたと考えられる。

Fig. 20(a)~(d)に、 $I=30$  kA、 $P_0=3430$  Nそして $P_2=100\%$ と一定にして、 $P_1=100, 65, 55$ 及び $50\%$ と変化させたときのナゲットのマクロ組織を示す。すでにFig. 13にも示したように、 $I=30$  kAの場合にはナゲット中に割れが形成されやす

かったが、Fig. 20から明らかなように、 $P_1$ を減少させると割れは減少し、特に $P_1=50\%$ の場合には割れは認められなくなった。ここで認められた割れは凝固割れであり、 $P_1$ を減少させることによって変形が少なくなり、割れが減少したものと考えられる。板厚方向の割れは $F_{max}$ にほとんど影響を及ぼさなかったため、Fig. 12に示した $P_1$ の減少に伴う $F_{max}$ の増大には、板表面に平行な割れの減少が影響を及ぼしたものと考えられる。

Fig. 21に、最大の $F_{max}$ が得られた30-3430-45-120の場合のSEM組織を示す。この場合もせん断破壊が認められたが、明りょうなディンプル模様が認められ、破面全体が延性破壊をしたことに

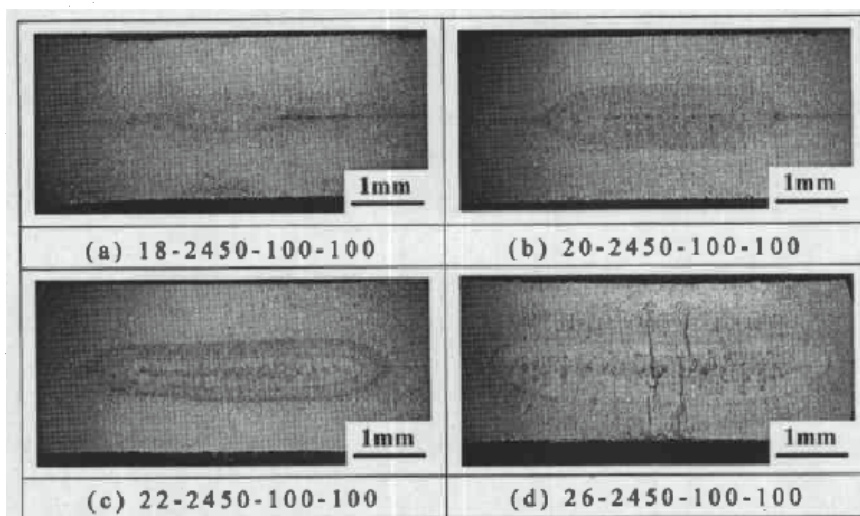


Fig. 16 Changes in macrostructures of welds for constant electrode force when changed welding current ( $P_0 = 2450$  N)

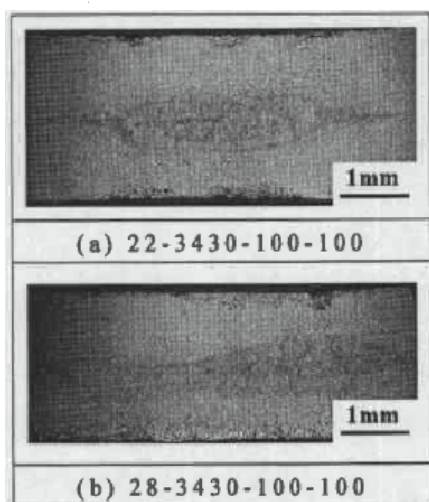


Fig. 17 Changes in macrostructures of welds for constant electrode force when changed welding current ( $P_0 = 3430$  N)

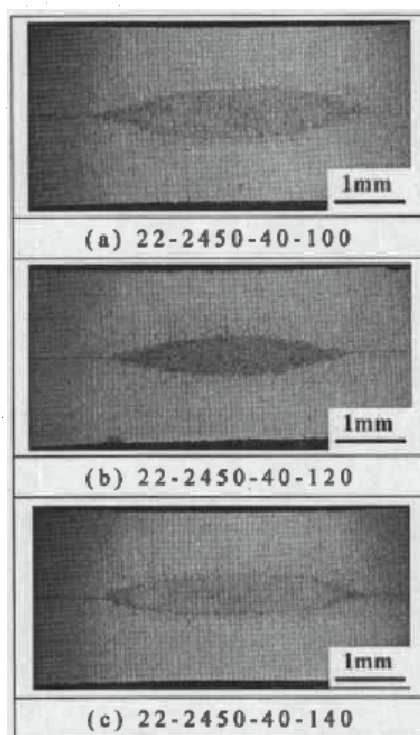
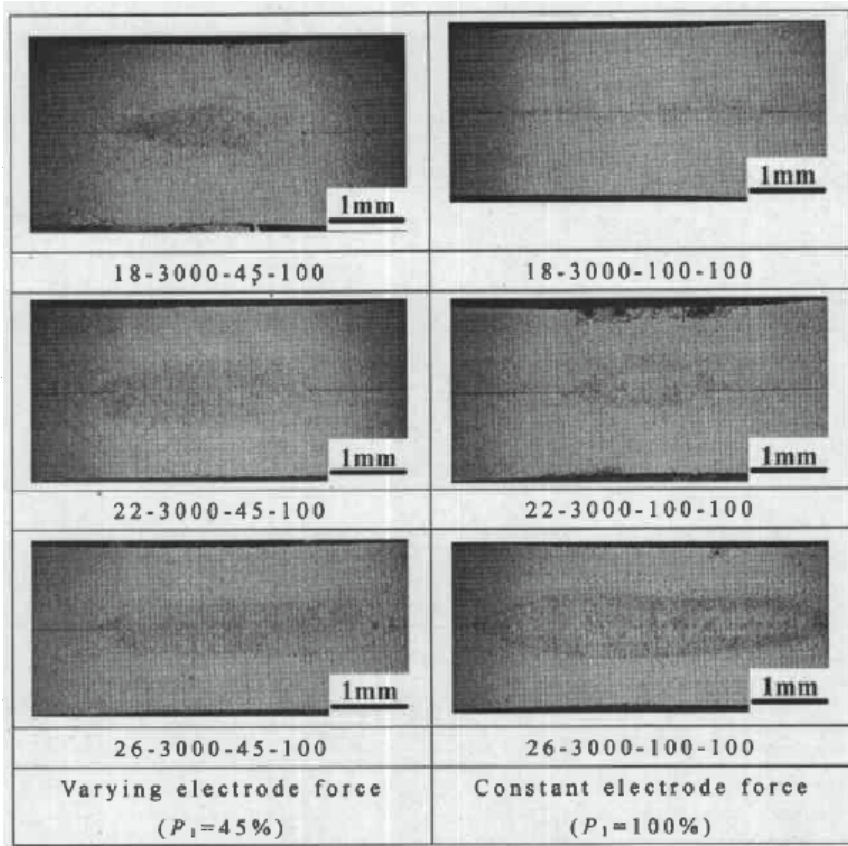


Fig. 18 Changes in macrostructures of welds for varying electrode force when changed the second electrode force ( $I = 22$  kA,  $P_0 = 2450$  N,  $P_1 = 40\%$ )

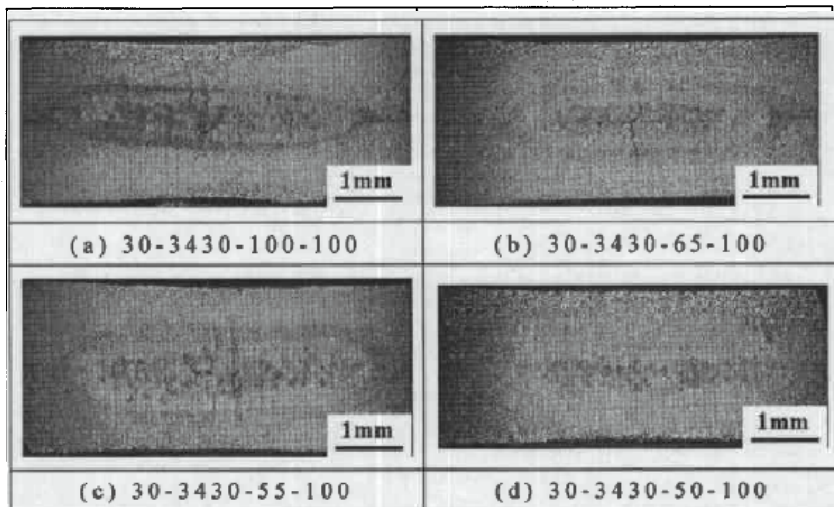
よって大きな  $F_{max}$  が得られたと考えられる。

## 5. 結 論

- (1) スポット溶接時の加圧力の時間的変化は、溶接電流、一次加圧力及び二次加圧力を変化させることによって複雑に変化したが、3種類に大別できた。



**Fig. 19** Comparison of macrostructures of welds when varied electrode force with those for constant electrode force ( $P_0=3000\text{ N}$ ,  $P_2=100\%$ )



**Fig. 20** Changes in macrostructures of welds when the first electrode force is changed for  $I=30\text{ kA}$ ,  $P_0=3430\text{ N}$  and  $P_2=100\%$

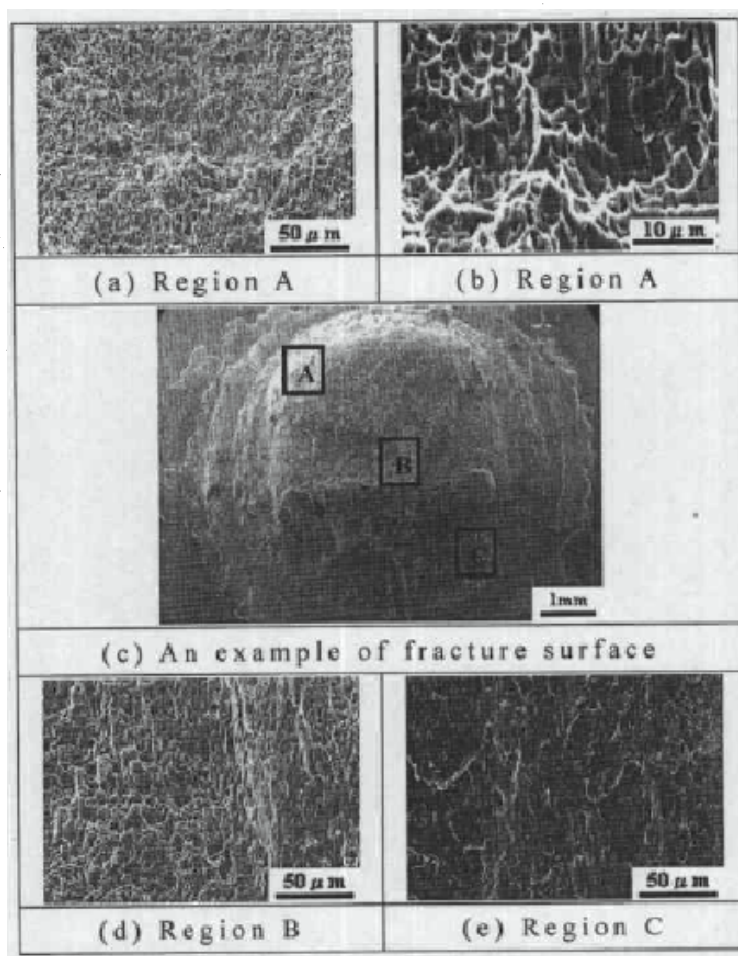


Fig. 21 SEM images of fracture surface (30-3430-45-120)

- (2) 加圧力を一定とした従来形のスポット溶接において、溶接電流及び一次加圧力を増大させると、ナゲット中には板厚方向に割れが形成されやすくなったが、この割れは溶接継手の最大引張せん断荷重にはほとんど影響を及ぼさなかった。一方、基本加圧力よりも一次加圧力を40~50%に減少させると、この割れは減少する傾向が認められた。
- (3) 十分なナゲットが形成されていたにもかかわらず、溶接継手の最大引張せん断荷重が小さかった試験体の破面のSEM組織を観察した結果、破面には溶融が十分でなかったと考えられる平坦な領域及び板表面に平行な割れが認められた。
- (4) 溶接電流、基本加圧力、一次加圧力及び二

- 次加圧力を独立変数、そして最大引張せん断荷重を従属変数として重回帰分析を行った結果、基本加圧力によって異なる結果が得られた。いずれの場合にも、最大引張せん断荷重と二次加圧力の間には相関は認められなかった。
- (5) 基本加圧力が2450 Nの場合、溶接電流及び一次加圧力を増大させるとともに、最大引張せん断荷重は増大する傾向が認められた。これは、溶接電流の増大に伴ってナゲットの大きさが増大したが、一次加圧力を減少させてもナゲットの大きさは増大せず、かえって減少したことに起因している。
- (6) 基本加圧力が3000 Nの場合、溶接電流の増大及び一次加圧力の減少に伴って最大引

張せん断荷重は増大する傾向が認められた。これは、溶接電流の増大及び一次加圧力の減少に伴ってナゲットの大きさが増大したこと、そして、溶接電流が大きい場合には割れが形成されやすかった傾向が、一次加圧力を減少させることによって割れの発生が減少したことに起因している。

- (7) 基本加圧力が3430 Nの場合には、溶接電流が比較的小さい場合にも板表面に平行な方向にも割れが形成されたために、最大引張せん断荷重と溶接電流の間には相関は認められなかった。しかし、一次加圧力を減少させると割れが減少する傾向が認められ、その結果、最大引張せん断荷重は増大した。
- (8) 以上の結果によって、良好なナゲットを得るためには比較的大きな基本加圧力を与え、一次加圧力を低下させることによって大きな最大引張せん断荷重を得ることが可能であることを明らかにした。

#### 参 考 文 献

- 1) 例えば、溶接学会、溶接・接合便覧、丸善(2003), p. 352; 中村 孝, 小林徳夫, 森本 一, 現代溶接技術大系, 第8巻, 抵抗溶接, 産報出版(1975), p. 1; 浜崎正信, 奥田滝夫, 稲田幹夫, 現代溶接技術大系, 第32巻, やさしい抵抗溶接・やさしいスポット溶接, 産報出版(1975), p. 1.
- 2) Furukawa K., Katoh M., Nishio K., Yamaguchi T., Study on the Development of Electrode Force Changeable Lap Resistance Welding Machine and Characteristics of Welds (Report 1), Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol. 24, No. 1 (2006), 1-9.
- 3) Furukawa K., Katoh M., Nishio K., Yamaguchi T.,

Study on the Development of Electrode Force Changeable Lap Resistance Welding Machine and Characteristics of Welds (Report 2), Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol. 24, No. 1 (2006), 10-16.

- 4) 新版接合技術総覧編集委員会, 新版接合技術総覧, 産業技術サービスセンター(1994), p. 331.

#### 執筆者の紹介



古川一敏



加藤光昭



西尾一政



山口富子



永田福太郎