論文および報告

点溶接におけるナゲット生成機構の研究*

—ナゲットに発生するリング模様について—

中村 孝** 浜崎 正信**

Some Studies of Nugget Formation Phenomena on Spot Welding*

—A Study on Oval Ring Figure Generated in Nugget—

by Takashi Nakamura** and Masanobu Hamasaki**

Abstract

In spot welding, if ordinary welding conditions are adopted, the nugget would begin to cool regardless of flowing the current after a certain elapse of time. Peripheral part of nugget will be columnar and inside of nugget will be cellular or cellular dendrite structure. The area of columnar structure becomes larger as weld time elapses and at last the whole nugget will assume the columnar structure. Oval-ring-like figure appears in this columnar structure. We corroborated with the help of special control timer made by us that this oval-ring-like figure occurred as the result of cooling with repetition of heating and cooling by the alternating current.

1. は し が き

点溶接において、ある時間以上通電（ウェルド）時間を長くすると、ナゲット内にリング模様の生ずることはジュラルミンの溶接において知られている^{1,2)}。この模様の生ずるのは、ある時間以上経過すると、電流を流しているにもかかわらずナゲットは冷却し始め、この電流は正弦波の交流であるから、電流のピーク値に近い時期と、零に近い時期とでは加熱状態が異なり、熔融金属と凝固金属との温度勾配に差を生じ、凝固速度が異なるためと想像されていた。しかし、明瞭に断言するほどの実験の証明も、理論的考察も今まで行なわれていない。著者らはこのようなリング模様は、ジュラルミンのようなアルミニウム合金のみならず、軟鋼でも生ずることを知ったので、板厚 1.0 mm の軟鋼を使用し、特殊な制御装置を製作し、溶接途中で半サイクル (0.01 sec) だけ通電を停止したり、ヒート・コントロールして電流を変化さすことにより、点溶接中 加熱状態に変化を与え、その結果 リング模様は、通電中にもかかわらず生ずる冷却と、交流加熱とに起因することを実験的に証明したものである。

2. 実験材料および実験装置

実験に使用した材料は主として板厚 1.0 mm の磨き軟鋼板であり、じゅうらいからいわれているリング模様の

確認のため、ジュラルミン（アルミニウム合金2024）も使用した。

点溶接では、一般に時間とともに溶接部の抵抗が変化するため、電流は Fig. 1 のように変化するが、この実験に使用した溶接機は Fig. 2 に示すように研究用のものであり、普通のスポット溶接機に比べ、2次インピーダンスは少し低く（約 $200\ \mu\Omega$ ）、時間の経過とともに電

Fig. 1 Changing traces of welding current

流の増大する傾向はやや大きい。電流の測定は特別な場合でない限りポイント・ストップ・アンメータを使用しているので、溶接電流は通電の終期の値を測定していることになる。たとえば、通電時間10サイクルと40サイクルでは、最終電流値 I_{10} , I_{40} が同じになるように電流のセッティングを変えているので、電流の時間的変化は I' , I のように異なっている。しかし、一部については電流のセッティングはそのまま時間のみ変えることも行なっている。

* 原稿受付 昭和42年9月5日

** 正 員 電元社 Member, Dengensha Mfg. Co., Ltd.

Fig. 2 Spot welder and instrumentation used for experiment

Fig. 3 Electrode tip contours

実験に使用した電極チップの形状は、Fig. 3 に示すように CF 形および先端半径 10 mm の R 形（ラジウス形）である。制御装置は同期式タイマであり、リング模様が交流の波形によるものであることを証明するため、通電途中で電流をヒート・コントロールしたり、ある時期に半サイクルだけ通電を停止することができような特殊なものも使用している。

テスト・ピースは切断しマクロエッチしているが、腐食液は軟鋼のときはすべてピクリン酸アルコール、アルミニウム合金のときはキラー氏液を使用した。

3. 溶接条件

点溶接の条件の選定においては、（溶接）電流、（電極）加圧力、（通電）時間などは、かなり自由に選択できるわけであるが、普通はある電流を選んだとき、散りが出ない範囲で最低の加圧力が使用される。Fig. 4 は RWMA の溶接条件の電流と加圧力との関係を示したもので、図中 A, B, C はそれぞれ A 条件、B 条件、C 条件を示している。実験に使用した溶接機では散り限界曲線

Fig. 4 Relation between current and electrode force on the welding condition used for studies

は C 条件に相当するもので、この曲線より低い加圧力では散りを発生し、高い加圧力ではナゲットは小さくなり強さは低下するし、経済的にみても大型の溶接機を使用しなければならないので、あまり好ましいことではない。したがって、この C 条件に相当する曲線を基準にし、図中に丸印で示すような電流と加圧力の組合せ、すなわち、R 形および CF 形チップで、それぞれ 25 通りの条件で通電時間を変えて溶接したものである。

4. 実験結果およびその考察

4.1 通電時間とナゲットの組織^{4,5)}

R 形チップを使用し、通電時間を変えたときの代表的な例として、電流、加圧力、それぞれ 5800 A, 75~150 kg; 9000 A, 250~500 kg の場合のナゲットの変化を示すと Fig. 5, Fig. 6 のようになる。他の条件の場合でも、ほぼ同様の傾向を示すのでここには省略する。CF 形チップの場合でも同じであるが、リング模様の出始める時期は R 形チップに比べ少し早い点が異なるだけである。CF 形チップの場合はここでは省略し、電流のセッティングを同じにしておき、通電時間を変えてナゲットを調べたこともあるので後述する。

Fig. 5 Correlation between weld time, electrode force and nugget structure (welding current 9000A, R type tip used)

Fig. 6 Correlation between weld time, electrode force and nugget structure (welding current 5600A, R type tip used)

通電時間を長くしたときの、これらのナゲットの組織の変化を判りやすいように図示すると Fig.7 のようになる。ナゲットはある時間内では (a) から (b) と、時間とともに大きくなり、この時間内では柱状晶内にセルとかセラデンドライトを含む組織となるが、ある時間以上長くなると、(c) のように一見ナゲットは非常に小さくなったように見える。しかし、よく観察すると、ナゲットの大きさはそのまま、外周部は柱状晶のみで、サブ・ストラクチャーとしてセル組織とかセラデンドライトが認められない場合が多く、認められるにしても不明瞭である。そして平滑界面成長をし、ナゲットの中心

部のみが柱状晶内にセルまたはセラデンドライトを含む組織となり、この組織が黒く見え、これだけがナゲットのように見えるためである。さらに時間が長くなると (d) のようにナゲット全体が柱状晶のみのサブ・ストラクチャーを含まない平滑界面組織となり、(c) (d) のように柱状晶のみの平滑界面組織の所にリング模様を生ずる（一部セル組織の部分にもリング模様が生ずることもある。以後、単に柱状晶のみと記述したときは平滑界面組織のものを指す。）

しかしたとえば、Fig. 5 で加圧力 250 kg, 時間40サイクルのもののナゲットをみると、黒く見えるセルとか

Fig. 7 Schematic illustration in relation between weld time and nugget structure

セラー・デンドライトを含む部分は非常に小さい。これがナゲットでないことは今までの説明で充分理解できると思うが、もっと大きく考えリング模様の出始めている所と考えても、同じ加圧力で時間10サイクルのものと比べるとナゲットは小さい。電流、加圧力は同じで、時間を長くした場合、ナゲットが小さくなることはありえない。これは Fig. 1 において説明したように、10サイクルと40サイクルでは最終電流値を同じにしてあるので、同じ10サイクル目で比較すると、40サイクルの場合は電流が低いためである。この研究ではリング模様の状態を知るのが目的で、ナゲットの大小はあまり重要な問題ではないが、念のためR形チップで電流 9000 A、加圧力 500 kg のものについて電流のセッティングを同じにしておき、通電時間を変えてみると Fig. 8 のようになる。

Fig. 8 Correlation between weld time and nugget structure (current 9000 A, current setting fixed, R type tips used)

ナゲットの組織、リング模様の出かたは Fig. 5, Fig. 6 と全く同じであり、真のナゲットの大きさ10サイクルでも20～34サイクルでも、ほぼ同じであり小さくなることはない。

Fig. 9 は CF 形チップの場合であり、最終電流値を同一にし、時間を変えたナゲットの状態についてはR形チップの場合とよく似ているので省略したが、ここに電流のセッティングを同じにし、時間を変えた場合のものを示しておく。Fig. 8 のR形チップとCF形チップのFig. 9 の加圧力 500 kg を比較すると、傾向はよく似ているが、チップで加圧することにより、深い凹みを生じ、板厚が薄くなったのと同じ状態になるため、冷却しやすく、リング模様の生ずる時期はR形チップより早い、(Fig. 9 の加圧力 250 kg のものと、Fig. 5 の加圧力 250 kg のものと比較すれば加圧力は同じで、電流のセッティングは異なるが、電流はほぼ似ており、チップの形状のみが異なる場合である。これからCF形の方がR形チップより冷却時期の早いことがわかる。)

このように柱状晶のみを生じ、リング模様の生ずる傾向は、電流が同じときは加圧力が高いほど短い通電時

Fig. 9 Correlation between weld time, electrode force and nugget structure (welding current 9000A, current setting fixed CF type tip used)

Fig. 10 Relation between weld time, current and tensile shear strength

間で生ずる。これは加圧力が高いときは、電流の流れる断面積が広く、したがって、電流密度は低くなり、ナゲットが冷却期間に入る時期が早くなるためと考えられる。

(9200 A, 230 kg), (7800 A, 150 kg), (5800 A, 80 kg) とそれぞれほぼ A,B,C 各条件に近い値で、加圧力、電流のセッティングを固定しておき、通電時間のみを変えて引張せん断強さとの関係を求めてみると Fig. 10 のようになる。ある時間以上経過すると強さは一定となり、それ以上は増加しなくなる。ナゲットは冷却し始める前に飽和し、ある時間飽和した後冷却し始める。このため、強さの一定になる時期とナゲットの飽和する時期とは一致するはずであるが、ナゲットは飽和し、それ以上大きくならなくとも、コロナ・ボンドの部分が増加し、

これが引張せん断強さの増大に役立っているため、強さの飽和する時期は少し遅れる。(これについてはいずれ続報において詳述する予定である。)

4.2 リング模様

リング模様は理想的には Fig. 11(a) のようになるものと考えられるが、実際には溶接中電極チップの母材へ

Fig. 11 Various types of oval rings generated in the nugget

Fig. 12 Nugget structure (a) Schematic illustration of oval ring (b) Focused in oval ring (c) Focused in columnar structure

Fig. 13 Micro structure of oval rings (columnar grain + cellular structure)

の接触状態、チップの形状、電流の分布状態により、からならずしも理想的にはならず (b) とか (c) のようにな

る。この場合、図中矢印のリング模様は通常よりも早い時期に生ずる。

リング模様を拡大したものが Fig. 12, Fig. 13 であるが、Fig. 12 はナゲットの中心までリング模様の出たもので、(b), (c) はそのマクロ組織、(a) は判りやすいようにリング模様を線画きしたものである。Fig. 13 はナゲットの途中までリング模様の出たもので、柱状晶のみの所はもちろんのこと、セラー組織の一部にも出ている。

このリング模様は拡大するほど見にくくなるし、ナゲットの組織にピントをあわせると見えにくいものである。Fig. 12 (b) はリング模様にピントをあわせたものであり、これをナゲットの柱状晶にピントをあわせたものが (c) である。

しかし、よく注意して見れば、(b) の写真の中にも柱状晶が見られるし、(c) の写真の中にもリング模様が少し見える。軟鋼でもリング模様が見られるにもかかわらず、一般に知られてなかったのは、このようにピントのあわせ具合により不明瞭になるためと思われる。このリング模様をさらに拡大 (400倍) したのが Fig. 14 であるが、リング模様はわずかに見られるが、次述するアルミニウム合金の場合のように結晶粒に明瞭な変化は見られない。(図中矢印の所がリング模様)

Fig. 14 Micro structure of oval rings $\times 400 \times 1/2$

Fig. 15 Oval rings generated in nugget of Al alloys (2024)

Fig. 16 Nugget micro structure of oval rings of Al alloys (2024) $\times 400 \times \frac{3}{4}$

Fig. 15 は板厚 1.0 mm のアルミニウム合金2024を、電流 17000 A, 加圧力 200 kg, 通電時間 5 サイクルの条件で溶接したもののマクロ組織を示したものであるが、ナゲットの外周部に矢印で示すように白いリング模様が出ている。このリングの帯は 3 本あるから、3.5 サイクルでナゲットは飽和し、あとの 1.5 サイクルは冷却始めていることを示している。Fig. 16 はこの一部を 400 倍に拡大したものであるが、図中点線で示すラインが、マクロ組織で白く見える所である。文献 (2) ではリング模様は光線のあて方によって現れ、結晶の状態はあまり変わらないようにいっているが、このミクロ組織からも明らかのように、白く見える部分は、結晶粒も比較的丸く大きく、他の部分は細長くなり明らかに異なっている。これは電源が交流であるため、電流のピークに近い時期では高電流による加熱のために溶融金属は凝固しにくく、電流が零に近い時期には著しく冷却され、すばやく凝固するためと考えられる。

Fig. 17 Oval rings in nugget structure when cut off current 1/2 cycle during spot welding (R type tip used)

軟鋼の場合と比べ、リング間隔が非常に広がっているのは、熱伝導がよく冷却効果がいちぢるしいためである。リング模様が出るのは液体が固体が変わるときであり、この状態における加熱・冷却が問題になるのであるが、熔融状態を考えに入れず、交流で加熱した場合、ピ

ークの時期には加熱され、零の時期には冷却される。この間の温度の変動は熱伝導度に大きく左右され、軟鋼の場合は 3 %²⁾、アルミニウムは 33%、アルミニウム合金は 29% である。これからもアルミニウム合金の場合、リング間隔の広がるのが首肯される。

Fig. 18

Micro structure of oval rings
referring to Fig. 17 (b)

Fig. 19 Oval rings in nugget structure when welding current is cut off 1/2 cycle during spot welding (CF type tips used)

4.3 リング模様が交流の半サイクルの周期ごとに生じていることの確認

今までの実験により, 点溶接したとき, ある時間以上経過すると, ナゲットは増大するどころか電流を流しているにもかかわらず, 逆に, 冷却が始まり, 交流の周期のために加熱冷却を繰返し, 熔融金属と凝固金属との境界面の温度勾配が異なるためリング模様の生ずるらしいことが推定された。しかし, さらに交流の加熱冷却の周期によることを確認するため, 次のような実験を行なった。

a. 溶接中, ある期間(半サイクル)だけ通電を停止する。もしも, このリング模様が本当に半サイクルごとに生ずるものならば, 冷却期間に入った時期に, 一瞬, 電流を停止し, あとまた普通に通電すればリング模様の間隔が変化するはずである。このため特殊なタイマを製作し, 通電中, 半サイクルだけ通電を停止するようにし, その時期は自由に変えられるようにした。通電停止の時間を半サイクルにしたのは, 1 サイクルも停止するとその間に急激に冷却し, リング間隔が広くなり過ぎるためである。

Fig. 17 (a) は電流 8800 A, 加圧力 500 kg, 時間 19 サイクル, R 形チップを使用し, 普通に通電溶接したときのリング模様である。リングの帯は 10 本ある。ナゲットの外周部は少し不明瞭であり, もう 1~2 本あるかも知れないが 10 本とすると, 通電時間 (T_w) は 19 サイクルであるから, 14 サイクル目から冷却し始めたことになる。同じく (b) は同一条件で溶接し, 半サイクル, カットしたものであるが, 明らかにカットすることによりリング間隔は広がっている。半サイクルカットするまでの時間 (T_c) は 15.5 サイクルであり, 半サイクルカット後 T_c の時間は 6 サイクル通電している。Fig. 18 は Fig. 17 (b) の拡大図であるが, ピントのあわせ方が少し異なり, Fig. 17 (a) では半サイクルカット後, 帯は 3 本しか見えないが, Fig. 18 では不明瞭なものを入れると 5 本見えている。また, カットするまでは Fig. 17 (b) では 6 本見えるが, Fig. 18 では 3 本である。これは当然多い方をとらねばならないが, 半サイクルカットするまでの時間 (T_c) は 15.5 サイクルで, リング帯は 6 本であるから, 12.5 サイクルから冷却し始めたことになる。カット後 (T_c) は 6 サイクル通電し, 帯は 5 本あるから, よく一致している。冷却開始時間が 1~2 サイクル パラツクのはやむをえない。半サイクルカットしてもリングの帯の数はほぼ一致し, カ

ットした所だけリング間隔が広がっている。

Fig. 19 は Fig. 9 の CF 形チップを使い加圧力 250 kg, 電流 9000 A, 時間 20 サイクルのもののナゲットのコロナ・ボンド部に近い所の拡大図であるが, わかりやすいように, このナゲットを線画し, Fig. 19 に相当する所を点線で囲み Fig. 20 に示す。CF 形チップのときは, R 形チップに比べ凹みが深くなり, リング模様は無理にコロナ・ボンドの方へ押しやられるので明瞭になる。

Fig. 19 (a) はこの条件で普通に点溶接した場合,

Fig. 20 Nugget structure (welding current 9000 A, electrode force 250 kg, weld time 20 $\sim$, CF type tip)

Fig. 21 Effect on nugget structure and oval ring figure by 1.5 $\sim$ reduction of current after 5.5 $\sim$ normal current flow.

(b) (c) は同じ条件で溶接し、半サイクルカットする時期を、それぞれ 15.5 サイクル目、17.5 サイクル目にしたものであるが、カットする時期をずらすと、リング間隔の広がる所がそれだけずれている。これらの模様から判断し、ナゲットが冷却し始める時期は 12 サイクルくらいと考えられる (注. Fig. 17 とか Fig. 9 は R 形チップの場合であり、Fig. 19 は CF 形チップである。しかし Fig. 17 とか Fig. 19 は加圧力は 500 kg であり、Fig. 19 は加圧力 230 kg であり条件が異なるからチップの相違による冷却時期の比較はできない。

このリングの中は半サイクル通電を停止しても、リングが 1 つだけ抜けた間隔にならず、それよりもはるかに広く、3~4 個抜けたくらいの間隔になっている。これは電流を流していても冷却するのであるから、電流をカットすればいちじるしく冷却し、リング間隔 1 つ分よりはるかに広がるのは当然のことといえる。

(b) ナゲットの成長期間中に電流を低くする。

溶接条件により少し異なるが、Fig. 5, Fig. 6 などより明らかにように、R 形電極を使用した場合、ナゲット

が飽和し不明瞭ながらリング模様が出るのは 10~12 サイクル、冷却し始め比較的ハッキリ出るのは、加圧力が高く電流密度が低くなると 13~15 サイクルであるが、普通の条件では 17~20 サイクルである。したがって、10 サイクルまではナゲットは大きくなる一方でありリング模様を生ずることはない (注. Fig. 11 (b) (c) において、

Fig. 23 Variation of oval ring figures by weld heat control

矢印の所に出る時期はもっと早い、ナゲットの成長という点ではここに生ずる模様は考えに入れない。)

いま、通電時間を 10 サイクル以内に、その後、ヒート・コントロールして電流を下げるならば、その電流値によってはナゲットは冷却し、ヒートコントロールした時間だけリング模様が出るはずであるし、この電流の高低によってリング間隔が異なるはずである。

Fig. 21 (a) は電流 8600 A, 加圧力 250 kg, 時間 9 サイクルで溶接したときのナゲットであるが、リング模様は全然出ていない。9 サイクルでもナゲットは冷却しないから、5.5 サイクルなら当然のこと冷却してない。いま、5.5 サイクル 8600 A の電流を流し、1.5 サイクルだけヒート・コントロールして電流を絞る、それぞれ電流を 6500 A, 5200 A 流したものが Fig. 21 (a) (c) であり、これらのヒート・コントロールした電流波形をそれぞれの図の右に示しておく。明らかにリング模様は 4 本できており、その間の帯の数は 1.5 サイクルの 2 倍、すなわち 3 本できており、電流が少ないほど間隔は広がっている。Fig. 22 は同じ電

Fig. 22 Effect on nugget structure and oval ring figure by 2.5 ~ reduction of current after 6.5 ~ normal current flow ($\times 2/1$)

極チップで電流 8600 A, 加圧力 300 kg, 6.5 サイクル普通に電流を 8600 A 流し, 2.5 サイクルだけヒート・コントロールし, 電流をそれぞれ (a) は 6500 A, (b) は 5800 A, (c) は 4800 A に変えたものであるが, リング間の帯は 2.5 サイクルの 2 倍, すなわち, 5 本であり, ヒート・コントロールの電流値の大小により, リング間隔に狭広ができている。それぞれの図の右にヒート・コントロールした電流波形を示しておく。Fig. 23 はヒート・コントロールしたときの, 電流による発熱状態を示したものであるが, たとえば, 図中実線より上の部分だけエネルギーがあれば冷却しないものとする, 電流 I_1 の場合発熱は I_1^2 であり, T_{1C}, T_{1H} それぞれが冷却期間, 溶融期間となる。いまヒート・コントロールを下げ I_2 にすると, 発熱は P_2 となり T_{2C}, T_{2H} が同じく冷却, 溶融期間となり, T_{2C} の期間が長くなるので, その間に冷却凝固し, リング間隔が広がる。また, 溶融期間が短かいので, 溶融期間を示すリングそのものは不明瞭になる。あまり, ヒート・コントロールを下げると, この実線より低くなり溶融する期間がなく, 冷却一方となるのでリング模様は消失するおそれがある。このように, ヒート・コントロールをすると, その数だけリング模様が出るので交流の周期に起因することは明らかである。

5. 結 論

以上の実験により, 通電時間がある値以上にとれば,

(1 mm 板厚で R 形チップを使用すれば, 普通の溶接条件で 10~12 サイクルでナゲットは飽和し, 17~20 サイクルから冷却し始める) ナゲットはそれ以上増大せず, かって電流を流しているにもかかわらず冷却し始める。このとき, 交流であるため, 半サイクルごとに加熱, 冷却を繰り返しながら凝固するため, 凝固速度が異なり, 半サイクルごとにリング状の縞模様を生ずることがわかった。このようなリング模様での柱状晶のみを発生したナゲットと, その強さとの関係については続報において詳述する。

謝 辞

終りにこの研究を行なうにあたり, ご指導をいただいた大阪大学工学部の安藤教授, 西口教授, 松田助教授や, 終始, 協力していただいた電元社の小保方君に深く感謝するしだいである。

参 考 文 献

- 1) 沢井善三郎「抵抗溶接の溶接機構と溶接条件の選定」生産技術報告書 第1巻, 第7号
- 2) 石井 定「デュラルミン板点溶接部の断面について」航空研究所報告 第16巻, 第7冊
- 3) 安藤弘平, 中村 孝「点溶接における通電加熱冷却に関する熱時間定数について, そのⅡ」接学会誌 第26巻, (1957) No. 12
- 4) W.F. Sanage 「Weld metal solidification mechanics」W.J. No. 4, 1965
- 5) W.C. Malatest 「Solidification and segregation in welding of binary alloys」W.J. No. 2, 1967

次 号 予 告

資 料

<抵抗溶接>

最近の自動車車体溶接用多極点溶接棒について……………由 井 勲

自動車工業における抵抗溶接自動化の動向について……………建 内 克 義

特 別 寄 稿

溶接自動化の第2段階……………ウェルナー・ギルデ

論文および報告

木材のプラスチック溶接に関する研究……………{大 西 巖
木 村 博

溶接金属の窒素含量におよぼす電極鋼線中の……………{小 林 卓
Ti, Zr および Al の影響……………桑 名 郎
木 口 武
立

金属の接着に関する研究(第2報)……………{大 西 巖
岡 本 郁
井 町 正
村 樹
崎 孝
正 信

点溶接におけるナゲット生成機構に関する研究(第2報)……………{中 村 正
浜 崎 正

文 献 紹 介

研 究 速 報