

2014年10月29日

抵抗溶接技術を担当しております開発技術部の中島敏治でございます。

抵抗溶接機器の設計者であった私は、1986年40歳の時に本田技研に入社することになりました。設計に配属されたもの実際に手掛けたのは、抵抗、アーク、レーザ溶接の技術課題解決の仕事でありました。抵抗溶接の常識的な知識レベルしかなかった私にとって荷の重い仕事ではありましたが、数々の幸運や製鉄各社研究者等の先達の指導にも恵まれ、何とか有意義な本田技研での20年間を過ごすことができたと思います。

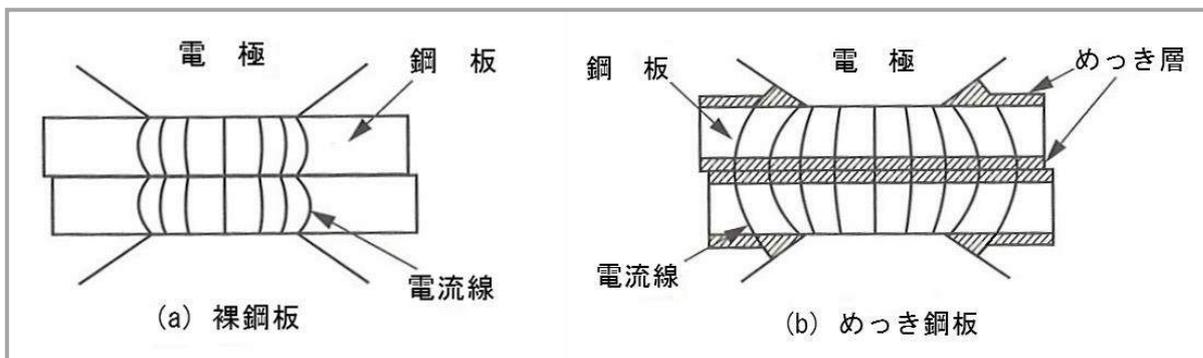
中でも、入社時に溶接工場のネックになっていた亜鉛めっき鋼板のスポット溶接では、最初にGA鋼板(合金化溶融亜鉛めっき鋼板)の溶接性改善につながる重要な発見をしたことから、製鉄メーカーとの共同研究を完成させた後も、チップドレッサの開発や亜鉛めっき鋼板の溶接現象の解明へと研究を進め、幾つかの新しい知見を得るに至りました。

スポット溶接の最大のユーザである自動車業界では、従前より三現主義(現場、現物、現実)に基いて溶接技術の改良、改善を進め世界一の生産技術を築いてきました。然るに、軟鋼の裸鋼板の時代に確立したスポット溶接技術は、軟鋼裸鋼板のあまりにも良好なスポット溶接性が仇となり、厳密なスポット溶接現象の解明に至っていない可能性があります。板間に生成する溶接部の直接的な観察は容易でなく、微小な板の表面状態や微小な溶接時間中に常温から溶融点までの急激な温度変更を伴うスポット溶接現象は、しばしば人間の経験や勘を裏切り、錯誤を招きます。

防錆や軽量化、衝突安全性の向上を目的に自動車のボディ素材は大きな変化を遂げており、より科学的なスポット溶接技術の向上が求められています。私は、20年間の溶接技術開発で得た知見を「溶接技術だより」の中でのなるべく判り易い形で定期的に発信していきます。丸暗記的な理解で無く、自分自身で考え、納得したものだけを新たな知識としてファイリングしていただければ幸いです。

2015年1月6日

明けましておめでとうございます。今年は、抵抗溶接の見方、考え方を見直して、技術で会社に貢献できるといいですね。

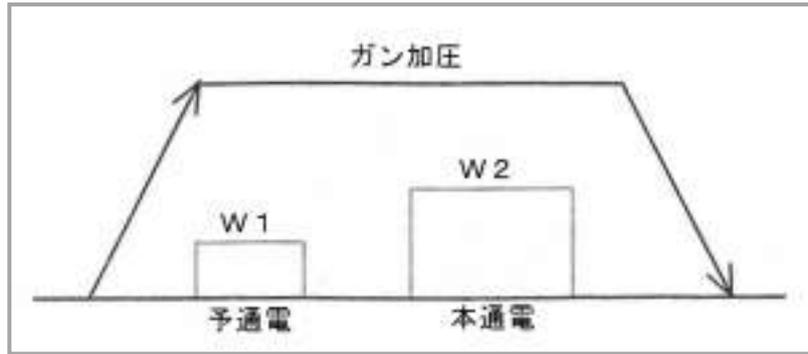


▲ (図1) 錯覚を招く亜鉛めっき鋼板電流経路の模式図

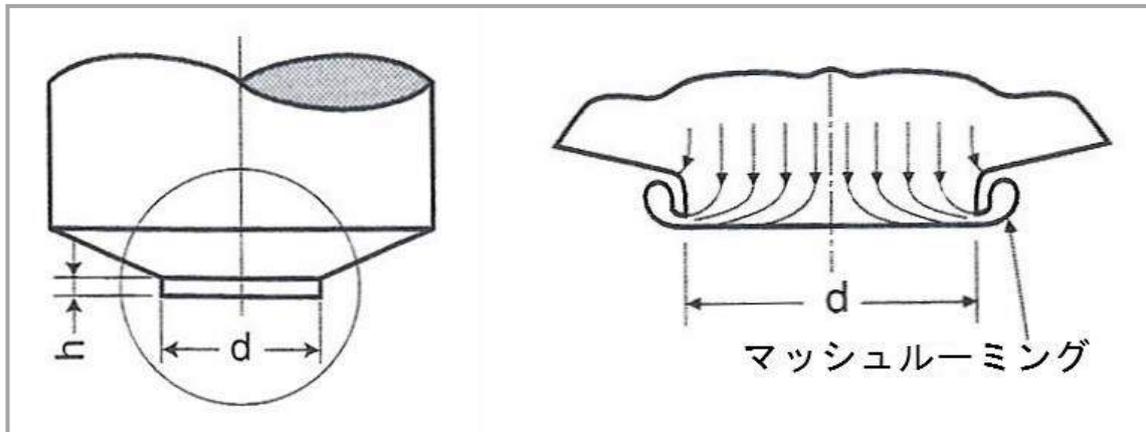
亜鉛めっき鋼板はナゲット形成能が低く、溶接電流を増すか通電時間を長めにとらないと所定のナゲットが得られないといわれています。ナゲット形成能が低い理由としては、融点の低い亜鉛が(図1)に示す様に電極先端部の外側に押し出されて電流通路が拡大し、電流密度が低下するためといわれてきました。

マクロ的な電流経路の拡大が、ナゲット形成能を低下させている原因だというのは本当でしょうか。自動車のボディ材として一般に使用されている片面あたり 45 (g / m<sup>2</sup>) の亜鉛めっきの膜厚は 5~6 (μm) といったところですから、板間の上下を合わせても 10 (μm) 程度にしかありません。10 (μm) すなわち 100 分の 1 (mm) の亜鉛が溶けて、電極先端部の外側に押し出されたとしても、電流経路の拡大による電流密度の低下は殆ど誤差範囲だと考えられます。

(図1)の模式図には、人間の錯覚を招く「落とし穴」が潜んでいます。模式図は溶接現象を判り易く説明するために板厚方向の厚さを実際よりも大きく表示しており、亜鉛めっきの厚みも大げさに拡大してあります。このため、実際には誤差範囲レベルの電流通路の拡大が、大変な電流密度の低下につながるとわかってしまったのです。



▲ (図2) ナゲット形成能の低下を助長する2回通電方式



▲ (図3) マクロ的な電流経路の制限で散りを助長するピンプル電極

溶融した亜鉛の押し出しによるマクロ的な電流経路の拡大が、亜鉛めっき鋼板のナゲット形成能の低さの原因だと考えたことによって、いくつかの誤った溶接法も生まれています。(図2)は、予電通によって亜鉛を溶接前に外側に押し出し、固定化してしまうという2度通電方式ですが、ナゲット形成能はかえって低下してしまいます。(図3)はピンプル(へそ)電極ですが、ナゲット形成能の向上にはさほど役立たないばかりか、電通終盤の通電路の拡大を妨げて、溶接散りの発生を助長するので推奨できません。

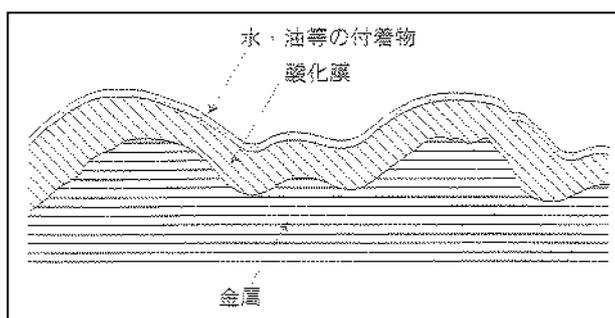
そうはいつでも、亜鉛めっき鋼板のナゲット形成能が低いのは紛れもない事実ですから、今回は、その本当の理由について説明していきたいと思ます。

2015年6月29日

亜鉛めっき鋼板のナゲット形成能は、裸鋼板のそれに比べて何故低いのでしょうか。

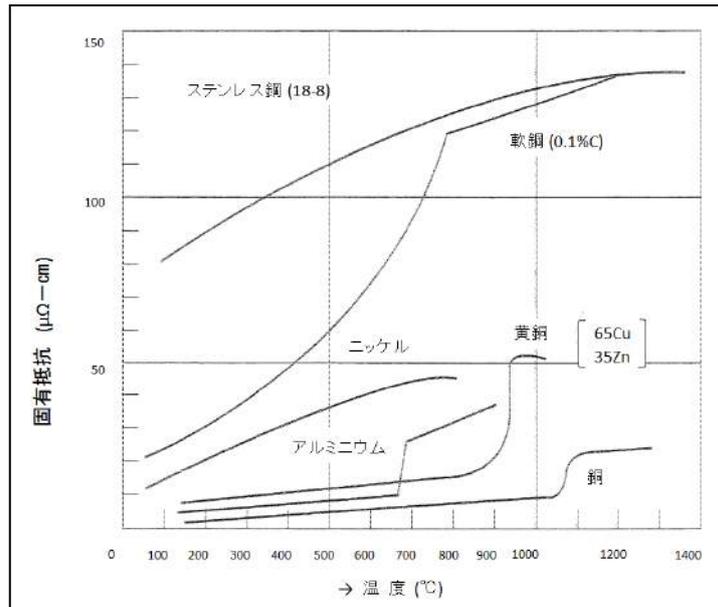
溶接ナゲットは、板間溶接部の抵抗発熱によって成長していくのですが、その総発熱量  $Q = 0.24 \rho \delta^2 S \ell t$  (cal) で算出できます。但し、温度上昇は単位体積当たりの発熱量  $q = Q / V$  に支配されており、体積  $V = \text{面積 } S \times \text{距離 } \ell$  ですから  $q = 0.24 \rho \delta^2 t$  となり、時間  $t$  当りの温度上昇は、 $\rho \delta^2$  によって決まることになります。

$\rho$  は溶接部材料の固有抵抗であり、 $\delta$  は電流密度(電流  $I$  / 電流路面積  $S$ ) です。 $\rho \delta^2$  は発熱密度と呼ばれ、スポット溶接の過程において、裸鋼板と亜鉛めっき鋼板とでは、その様相が大きく異なります。



▲ 図 003-01 大気中における金属の表面状態

鋼板の表面は、図 003-01 に示す通り酸化被膜や水・油等の付着物に覆われているばかりか、ミクロ的な凹凸もあって、完全な平面という訳ではありません。スポット溶接では、高い加圧力が加わることによって酸化被膜が破壊され、凹凸の山も潰されて真の金属同士の接触点生まれ、通電初期の電流通路が確保されます。この時、軟らかな亜鉛めっきを施した亜鉛めっき鋼板では低い山まで圧潰し、接触面積が増加するために電流密度が低下し、発熱密度  $\rho \delta^2$  は裸鋼板の場合よりも低レベルになってしまいます。また、融点の低い亜鉛は、逸早く溶融し液体化するために、ミクロの凹凸は消滅し、点接触から面接触に移行します。このため、電流密度が一挙に低下し、溶接部の温度はなかなか上昇してくれません。



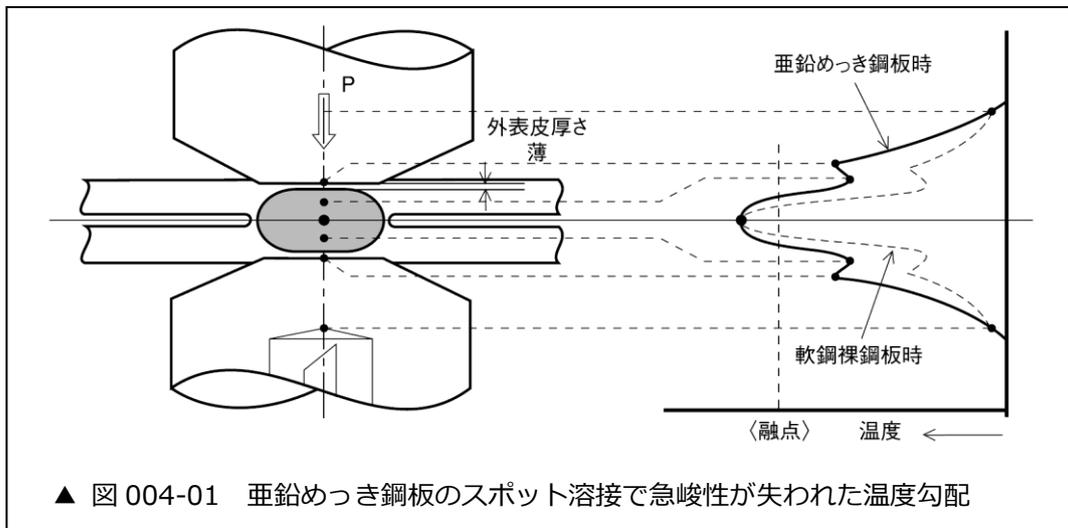
▲ 図 003-02 各種金属材料での固有抵抗の温度依存性

ところで、接触抵抗は 0.5 サイクル程度の短時間で消滅するため、接触抵抗による初期発熱は極わずかで、溶接全体に与える影響は殆ど無いという考え方があります。しかし、スポット溶接の抵抗発熱は、全体や平均値で考えるのではなく、通電時間の経過の中で、その時々溶接部の温度レベルと、それによってもたらされる発熱密度  $\rho \delta^2$  の変化を注視すべきなのです。図 003-02 は、各種金属の温度毎の固有抵抗値を表した抵抗温度曲線ですが、軟鋼における固有抵抗の温度依存性が、際立って大きいことが判ると思います。亜鉛めっき鋼板の場合は、初期発熱が小さいために、溶接部の温度の立ち上がりが遅れてしまいます。温度上昇が遅れると固有抵抗  $\rho$  の値が大きくなりませんので、その後の発熱密度  $\rho \delta^2$  は低レベルのままに推移し、雪だるま式的な抵抗発熱の連鎖が阻害されてしまいます。これが、亜鉛めっき鋼板のナゲット形成能が低い理由です。

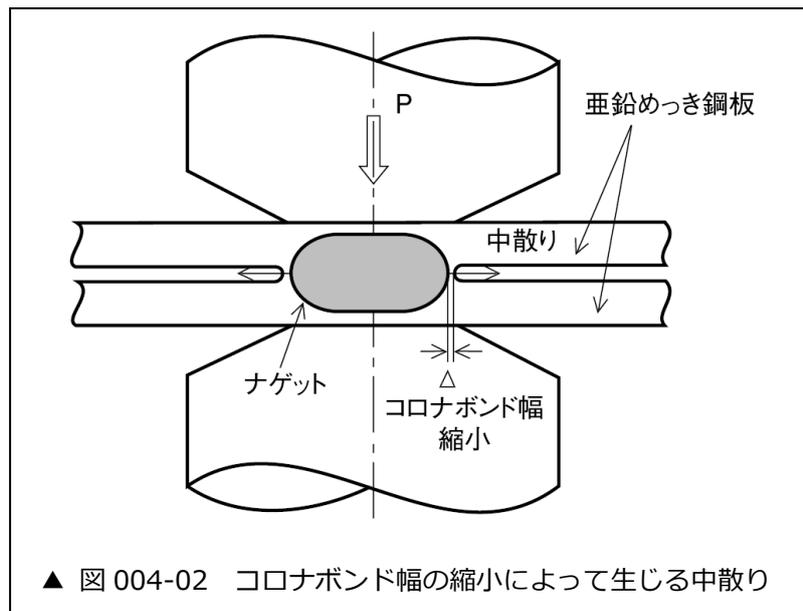
亜鉛めっき鋼板のスポット溶接では、ナゲット径の確保もさることながら、電極と板が溶着してしまうスティッキング現象や溶接散りも大きな問題であると思います。溶接電流、通電時間や加圧力を場当たりに変更しても、それはモグラ叩きに終わってしまいます。

次回は、亜鉛めっき鋼板特有の溶接現象について理解を深め、正しい問題解決の方法を考えていきたいと思えます。

亜鉛めっき鋼板のスポット溶接では、板間の発熱レベルが低く効率的な抵抗発熱の連鎖が阻害されるために、ナゲットの径方向への成長が遅れがちになります。これをカバーするために通電時間を長くしたり溶接電流を増やしたりするのですが、今度は電極と板の溶着現象（スティッキング）や激しい中散りの不具合が発生するようになり、問題解決は一筋縄にはいかないというのが実態です。



板間通電路の拡大が滞ると行場を失った溶融金属は板厚方向へと成長するようになり、大電流で発生した電磁力による電磁対流でかき混ぜられ、溶融部全体の温度が平均化してしまいます。(図 004-01) は亜鉛めっき鋼板をスポット溶接した時の溶接部の断面形状と温度分布を示した模式図ですが、裸鋼板時に見られる板間界面をピークに基石状に形成される断面形状は失せ、分厚く矩形状の溶接部が形成されています。母材表面の温度上昇・軟化によるインデンテーション（電極の母材への食い込み）の増加もあって電極先端と溶融部は益々接近し、電極先端部の温度は裸鋼板時の 400℃～500℃を遙かに超える 800℃以上にも達し、スティッキングの原因になります。



激しく噴出する中散りの原動力は前述の電磁力です。スポット溶接の終盤になると発熱密度 $\rho\delta^2$ のうち固有抵抗 $\rho$ の値が温度上昇によって高くなりますので、板間通電路の面積 $S$ が増加して電流密度 $\delta = I / S$

( $I$  : 電流) が低下しないと溶接部は過熱状態に陥ります。板間通電路の拡大が滞りがちな亜鉛めっき鋼板のスポット溶接において高目の溶接電流条件を採ると、溶接部の外側に形成された未熔融圧接部であるコロナボンドが過熱で一気に溶融してしまいます。コロナボンドは板間通電路であると同時に、強力な電磁力による噴出圧力で飛び出そうとする溶融部の液体化した金属を溶接部に封じ込めておく壁の役割を担っていますから、(図 004-02) に示す通り壁が縮小あるいは消滅した途端に激しい中散りが発生します。因みに散り防止のために加圧力を上げることの真の意味は、物理的な圧力の増加による直接的なマスキング力の強化にあるのではなく、加圧力を上げることによってもたらされるコロナボンド域の拡大による電流密度 $\delta$ の低減効果と、一定のコロナボンド幅の確保による壁効果の維持という二次的なものであるという事も理解しておいた方が良いでしょう。

亜鉛めっき鋼板のスポット溶接でつきもののスティッキングと溶接散りについての理解が深まったことと思います。しかし、もうひとつの大問題である電極損耗を抜きにして抜本的な対策は考えられません。

次回は亜鉛めっき鋼板特有の電極損耗形態と、電極損耗に関連した事象について説明したいと思います。