

特集：抵抗スポット溶接の最近の動向

抵抗スポット溶接の電源・制御装置の最新動向

電元社トーア株式会社
白井敏明

1. はじめに

抵抗溶接は1885年、後にボストンのマサチューセッツ工科大学の研究所長となったトムソン博士が発明して以来、今日では自動車・鉄道車両・家電製品などの製造に多数使用されている。

抵抗溶接の原理は被溶接物の接合部分に短時間に大電流を流すことにより、金属自身が持っている抵抗を利用したジュール熱により接合部を発熱させ接合するものである。このジュール熱を利用した身近なものとしてはドライヤーやホットプレート、トースターなどが有り、発熱の原理としては抵抗溶接と同一である。

スポット溶接はこの抵抗発熱を利用し、図1に示すように、水冷した電極で主に薄板金属2枚または3枚以上の被溶接材を重ねた部分を加圧し、被溶接材の上下面を冷やしなが、数千アンペア以上の大電流を1秒程度の短時間流し、被溶接材の接合界面を抵抗発熱で熔融させ、ナゲット（溶接部）を形成して接合する方法である。今回はこの抵抗スポット溶接の基礎知識を近年の制御装置の動向を交えて紹介する。

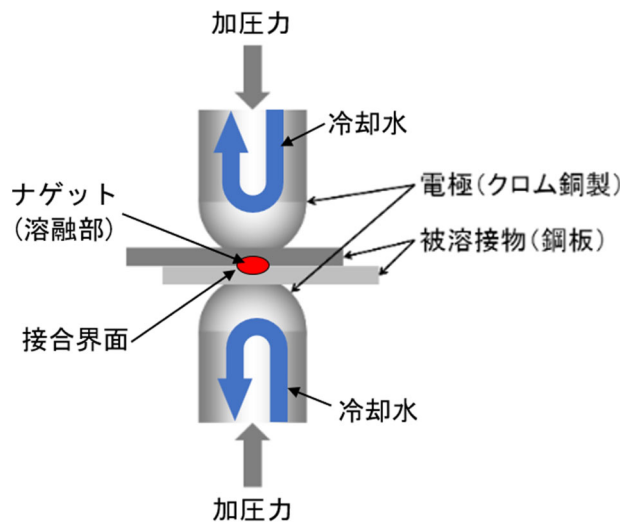


図1 スポット溶接の原理

2. 抵抗スポット溶接の電源種類

抵抗溶接機に使用される電源は、二次電流の種類から、交流電流、直流電流、およびパルス電流の3種類に大別され、図2に細分化される。各電源方式と出力電流の比較を図3に示す。

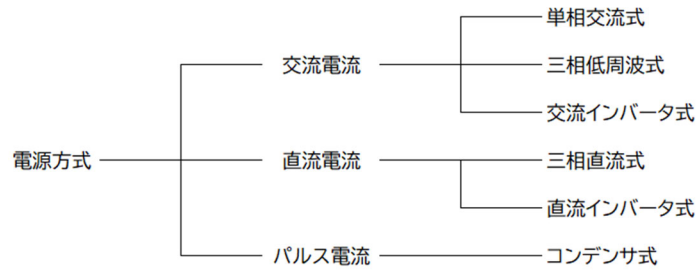


図 2 電源の種類

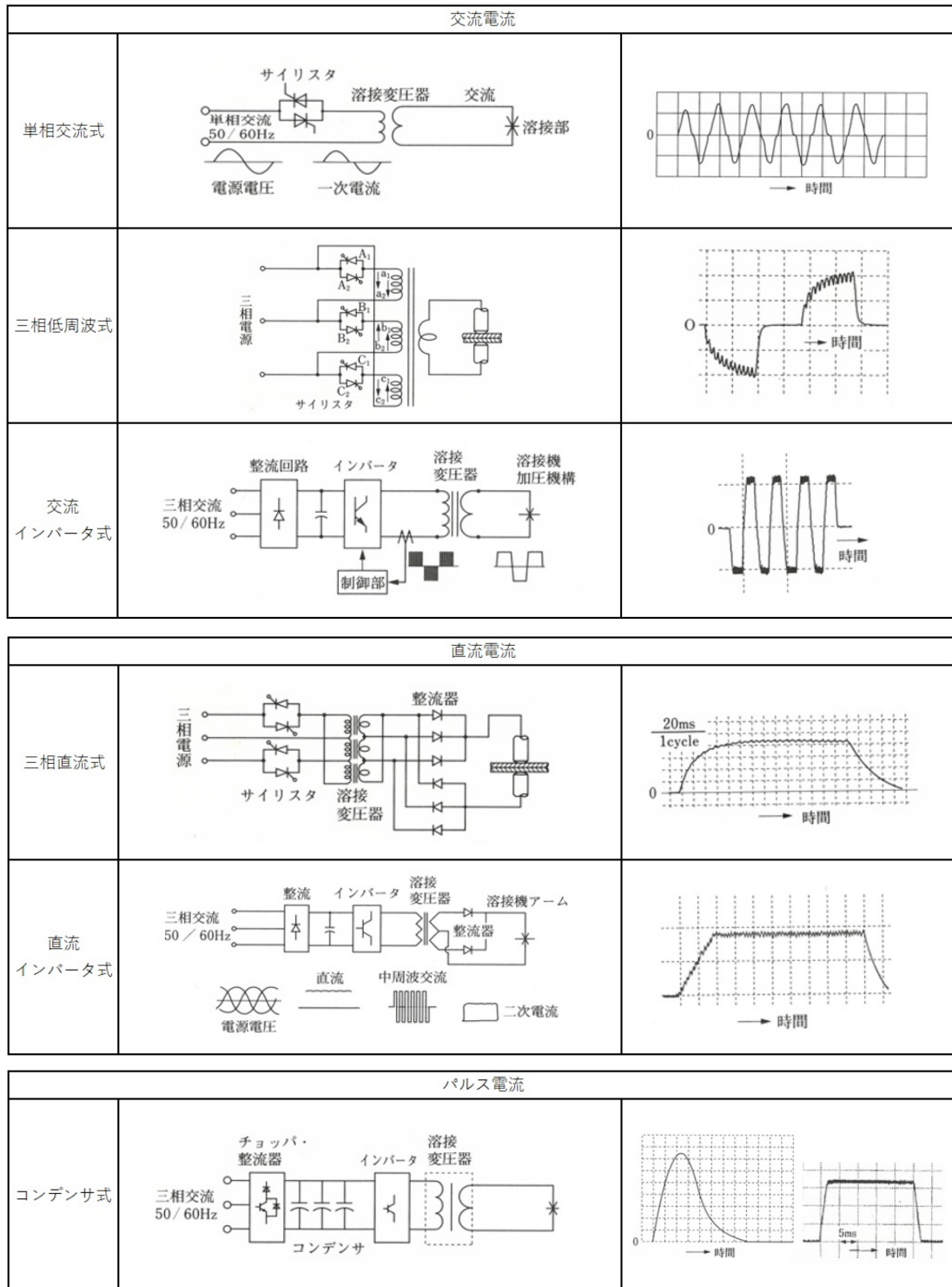


図 3 溶接電源と出力電流

単相交流式は古くから用いられている方式で、装置が簡単、制御も容易な利点がある。反面、大きな構造物を溶接するために溶接機のとこ寸法が大きくなると、二次回路のインダクタンスが大きくなり電圧降下が発生するので大きな電流を流す構造物には適さない。

三相低周波式は、3個の一次側コイルと1個の二次側コイルから構成される特殊な溶接変圧器を三相電源に接続し、二次側に数Hzの低周波電流を発生させる方式である。商用周波数より低周波になるため溶接変圧器の寸法、重量が大きくなるが、単相交流での問題を解消する特殊な溶接電源である。大きな電流を流す必要がある構造物は、車輛や航空機で使用される材料抵抗が小さいアルミニウム合金が主となっている。

交流インバータ式は、インバータ回路の制御プログラムを変更し、低周波の矩形波交流電流波形を溶接変圧器の一次側に供給できるようにした方式である。単相交流の溶接システムに溶接電源を交換するだけで、温度脈動の小さな溶接加熱が可能である。

三相直流式は、100,000A以上の大電流が流せる溶接電源である。三相入力に対応し3回路の変圧器を1台の溶接機に組み合わせたもので、溶接機二次側には6個の大電流整流素子を組み込む必要があるため高価となる欠点がある。

直流インバータ式は、ロボットに搭載するトランス付きガンの軽量化を目的に開発されたもので、自動車の車体製造ラインなどで多数使用されている。インバータ回路を利用し、溶接変圧器に供給される電源の周波数を高くすることで溶接変圧器の鉄心断面積を小さくできるため、溶接変圧器の小型・軽量化が可能となった。また近年、電力用半導体素子の進歩によって、大電流を流せる溶接電源も実用化されている。

パルス電流方式は、商用電源からの充電によってコンデンサに蓄えられた電荷を放出して溶接電流を供給する方法である。コンデンサに蓄えた電荷を、溶接変圧器を介して瞬時に放電し、ごく短時間に大電流を流すことが可能である。従来の制御方式では、コンデンサから放電した電流波形と溶接時間は充電電圧と溶接機の回路定数によって決まるので、自由に電流波形を制御できない問題があったが、近年ではインバータ制御により通電のオン/オフを高速に制御して一定の溶接電流を流すことが可能となっている。コンデンサ式は電源設備容量を小さく抑えることができるので、電気設備を更新しなくてもこれまで以上の大電流が流せるという特長がある。

3. 溶接電流の制御方法

先ほど紹介した各電源は、回路は異なっているが、インバータ制御やサイリスタ制御によって、実現されている。今日の多くはインバータ制御による溶接電源が主流になっており、特にスポット溶接では自動車の車体製造ラインに多くの直流インバータ式が採用されている。従来は単相交流式が多く使用されていたが、直流インバータ式にすることで溶接トランスが小型軽量化されることにより、サーボスポットガンが軽量化できるためサイクルタイムの短縮につながっている。

高機能化技術もインバータ制御によるところが大きい。そこで、基礎知識として、直流インバータ式のインバータ制御と単相交流式のサイリスタ制御を比較して説明する。

まずはサイリスタ制御による出力制御について説明する。図4に示すように溶接電源を配電盤から正弦波の商用交流が入力されると、半サイクル毎の通電開始時期をサイリスタと呼ばれるスイッチング素子で調整して電流を変化させる位相制御(ヒートコントロール)という方法で電流が制御される。位相制御をかけないで完全な正弦波の電流波形になる状態をフルウェーブと呼んでおり、出力

される電流の最大値を示すものである。サイリスタは一種のスイッチでタイマからゲート信号が入力されるとオンになる。これを点弧といい、そのタイミングを点弧角と言う。溶接電流は1回の点弧信号ごとに点弧角以降の半サイクル分だけ通流する。

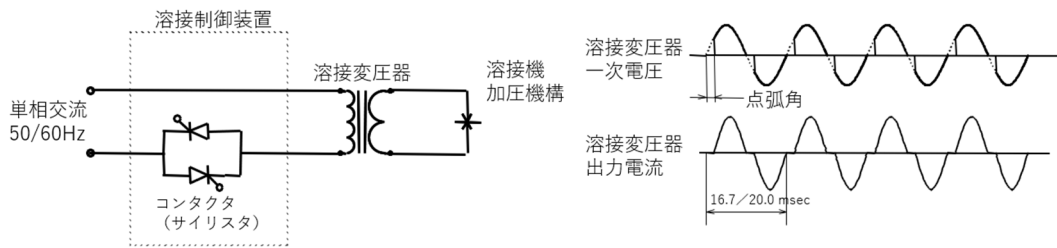


図4 サイリスタ制御回路

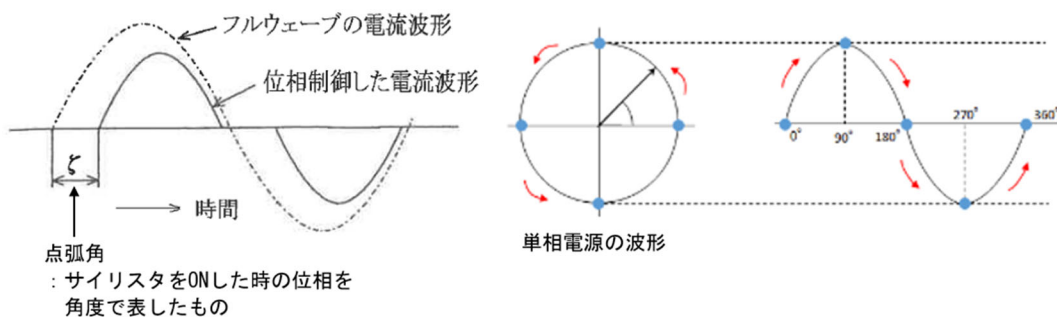


図5 位相制御

一方のインバータ制御では図6に示すように、変圧器の前に交流は直流に整流されインバータ回路を通して矩形波交流に変換され溶接変圧器に入力される。この溶接変圧器に供給する矩形波交流はIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor: 絶縁ゲート型バイポーラ・トランジスタ) によるPWM(パルス幅変調)制御で電流オン時間の長さを変えることにより溶接電流値や通電時間を調整されている(図7)。このオン時間の繰り返し周波数はインバータ周波数と言われ、1,000Hz~2,000Hzがよく利用されている。インバータ回路は、入力される交流周波数に左右されない出力制御である為、サイリスタと比べると1サイクル間に制御できる回数は数十倍にもなる。そのためインバータ制御方式は、電流値や電流波形を自由に調整ができるところに特長があり、短時間通電でも正確な電流波形制御がおこなえる。また、インバータ式では100%のオン期間設定はインバータ回路に短絡状態を生じさせて素子を破損させるため、フル通電といっても必ず通電オフ期間が伴う。近年では大電流に対応したIGBTも登場し、60,000A以上の電流出力も可能となっており、アルミニウム合金のスポット溶接にも採用されている。

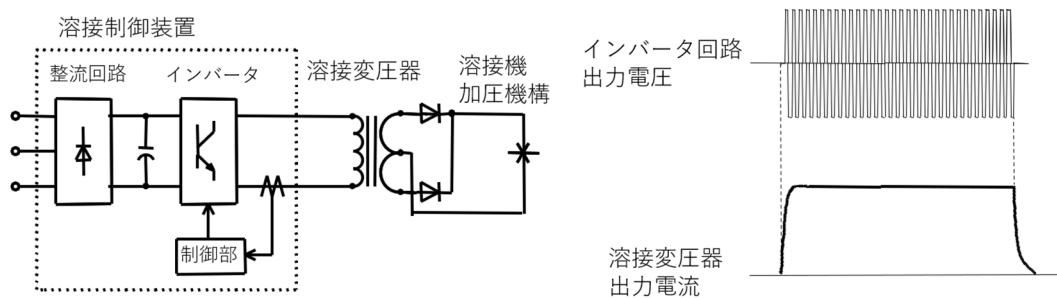


図6 インバータ制御回路

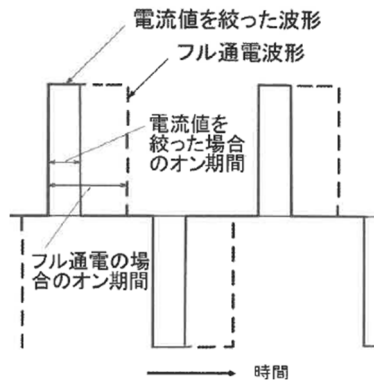


図7 IGBTによるPWM制御

4. 溶接機の高機能化

インバータ制御になったことで高速な出力制御が可能になり、出力電流を自由に作り出す波形制御が可能になった。最近の抵抗スポット溶接の傾向として自動車業界では燃費向上にむけた車体の軽量化として高張力鋼板が多用されている。しかし、スポット溶接性の観点から、軟鋼板と比較し高強度鋼板は固有抵抗が高く発熱し易く、また強度が高いため加圧力を増加させないと、鋼板間で十分な接触径が得られず溶接不良が起こる場合があり、従来に比べて溶接条件がシビアになっている(図8)。

その一つとして、散りの抑制や鋼板間の隙間対策、熱処理に対応する溶接シーケンスの多段通電化が挙げられる。従来は単通電の溶接シーケンスとなっていたが、通電と通電を繋げるスロープ通電など、より自由に溶接シーケンスを作成することが出来ることで、溶接電流の微調整などの対応が可能であり、溶接電源をインバータ化することのメリットにもなっている(図8)。

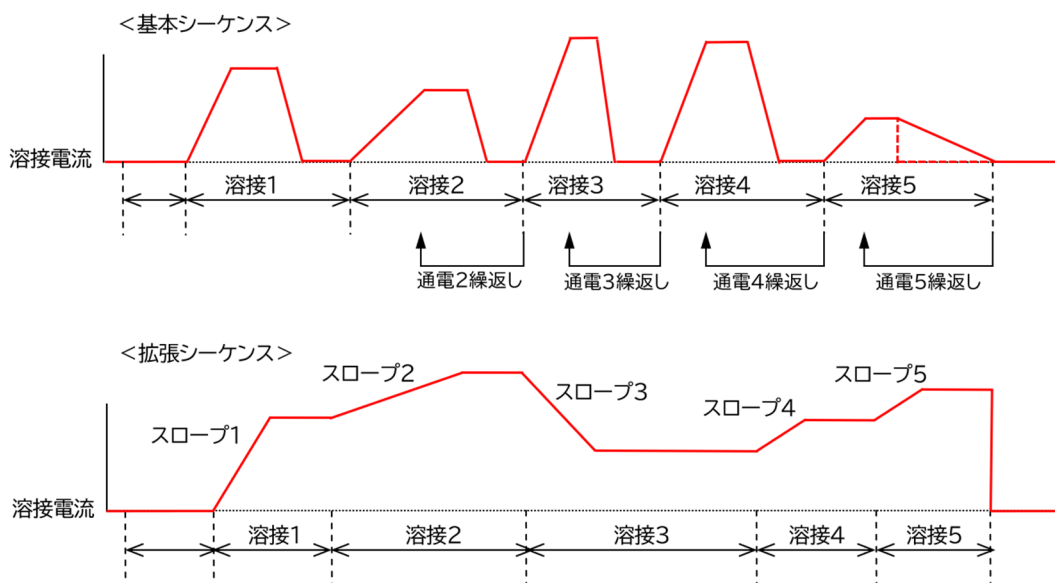


図8 溶接シーケンス

また溶接ロボットと連携し、溶接中に加圧力を変化させる可変加圧の制御も行われている。これらは通電毎に予め設定された時間経過後に、加圧力変更するタイミングと加圧力をロボット側に信号として送り、ロボットはそれを受信し、可変加圧動作を行う機能である(図9)。

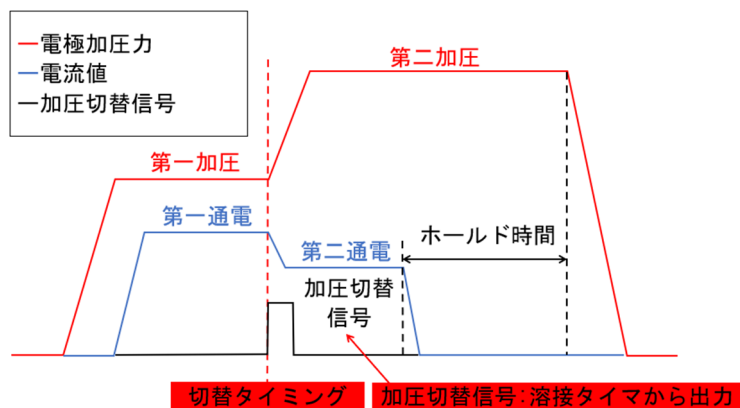


図9 可変加圧動作

さらには溶接状況に合わせ、自動的に電流や通電時間を調整し、散りの抑制やナゲット径 (図 10) の補償などを行う品質保証の観点での機能開発も行われている。実際の溶接現場では溶接する鋼板と電極の直角度や鋼板同士の板隙や分流、ロボットのティーチング位置とジグによる鋼板のクランプ位置のずれによる加圧力のアンバランスなど様々な要因から外乱が発生する。これら外乱が発生した状況で溶接を行うと、溶接品質に悪影響を与えるので、ナゲットの品質保証を行うことを目的として、溶接電流や通電時間を変化させることで溶接品質を向上させるアダプティブタイマ機能を搭載した溶接電源も開発されている。

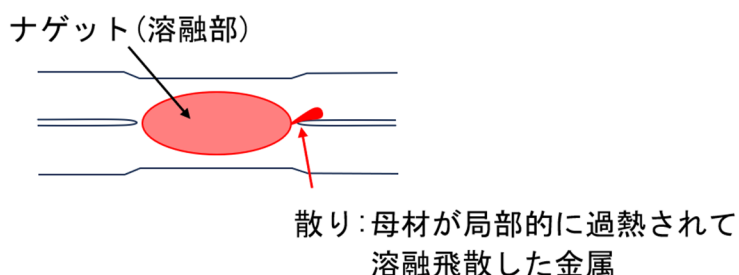


図10 ナゲットと散り

これまで、鋼板のスポット溶接について述べたが、近年は自動車の蓋物と呼ばれるドアやフードにアルミニウム合金を使用するようになってきた。アルミニウム合金同士のスポット溶接については、鋼板に比べて抵抗が小さく熱伝導率が高いため、より大電流を短時間で流す必要がある。また、ナゲット内にブローホールができやすいため、通電の後半で加圧力を増す多段加圧をする場合もある。このように鋼板のスポット溶接とは溶接機に求められる仕様が異なっているが、IGBT 素子の大電流化や可変加圧機能など合わせることで、今までとは違う材質への対応も可能となっている。

5. 溶接機の IoT 化

近年の IoT 化の波は溶接電源にも押し寄せて、溶接電源も工場のネットワークに接続されるようになっており、この機能は溶接電源の高機能化のひとつになっている。図 11 は弊社が開発したネットワークシステムであり、ロボットに搭載するサーボスポットガンの制御装置である溶接電源 (インバータ制御、サイリスタ制御) は、サーボスポットガンに流す溶接電流を制御するだけでなく、ロボットの制御盤と Ethernet/IP で接続され、溶接の起動や溶接完了、異常出力などの通信をしている。

更に工場の溶接監視ネットワークは Ethernet で接続されている。その Ethernet を通じて工場のクライアントから溶接機への溶接条件の書き込みや、溶接機からの溶接条件のバックアップ、データ管理サーバによる溶接モニタデータの収集が可能となっている。これにより、クライアントから異なるアプリケーションの抵抗溶接機の稼働状況をリアルタイムに一括して把握することができ、更にモニタデータをデータ管理サーバに送信し蓄積することで、トレーサビリティの向上が図れる。

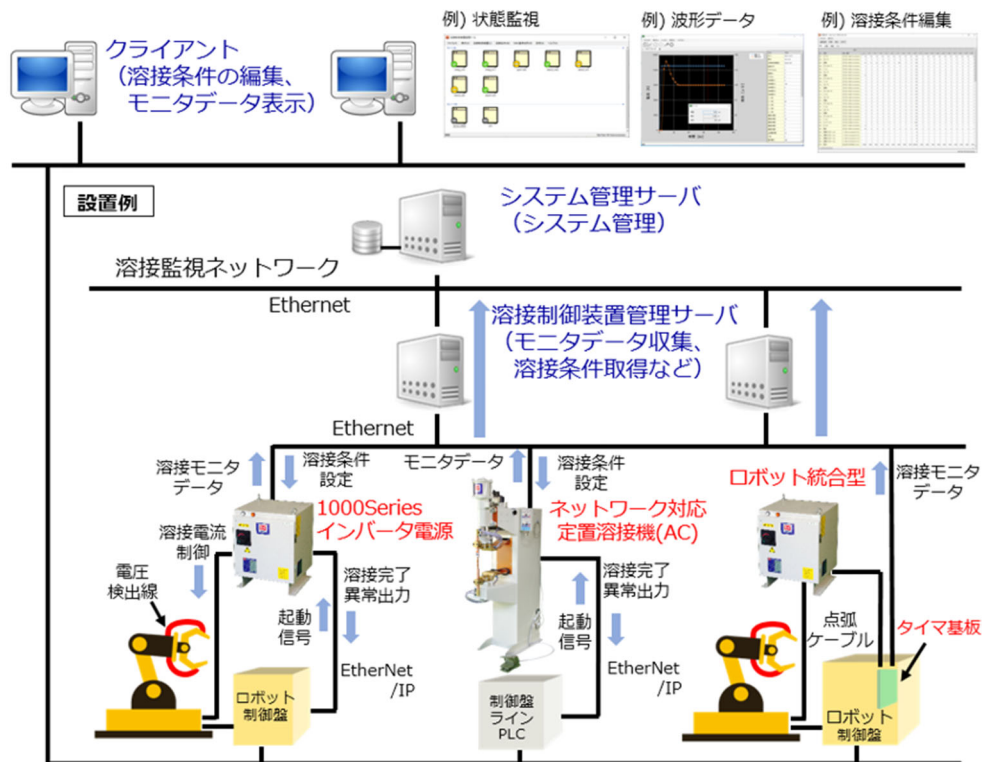


図 11 溶接ネットワーク

従来は溶接マスタ(職人)の感覚による品質管理が一般的であったが、蓄積された溶接モニタデータを使用して統計的な分析ができ、工場や材料の特性や傾向も併せて観察することで、最適な品質の見える化ができるため、担当者のスキルによらない品質向上が目指せるシステムになっている。最近では従来の溶接モニタデータだけでなく、各打点溶接時の溶接電流や電圧波形、加圧力値も同時に収集が可能になり、蓄積された溶接モニタデータと合わせた品質保証システムについても開発が活発化している。

6. おわりに

インバータ電源の登場により、ロボット溶接ガンの小型・軽量化に対応することでサイクルタイムの短縮や、出力制御の高速化により溶接品質の向上にも貢献してきた。また、溶接電源のIoT化として、溶接監視ネットワークによる品質保証システムの開発も行われている。

近年では自動車のボディに鋼板だけでなくアルミニウム合金や CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics : 炭素繊維強化プラスチック) が使用されるケースが増えている。アルミニウム合金の場合は抵抗溶接が可能であるが、摩擦攪拌接合やリベット、アーク溶接が採用される場合もある。また、一般的に CFRP の接合に抵抗溶接は採用されていないが、金属板と CFRTTP (Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics : 炭素繊維強化熱可塑性プラスチック) の接合であれば抵抗溶接技術を応用した樹脂

金属接合も可能となってきた。抵抗溶接は他の接合方法に比べて短時間で接合でき、作業者のスキルによらないことからボディ以外の部分での採用も増えており、今後も自動車産業にとっては重要な接合方法であるので誰にでも使いやすく多機能な抵抗溶接機の開発をしていきたいと思う。

参考文献

- 1) 松山欽一/高橋靖雄/長谷川和芳：抵抗溶接の基礎と実際，産報出版
- 2) 松山欽一/加瀬充：はじめてのスポット溶接，産報出版

<略歴>

白 井 敏 明 (しらい としあき)

2005年 株式会社 電元社製作所 入社

2017年 電元社トーア 株式会社(社名変更) 開発部 製品開発一課 配属

現在に至る