

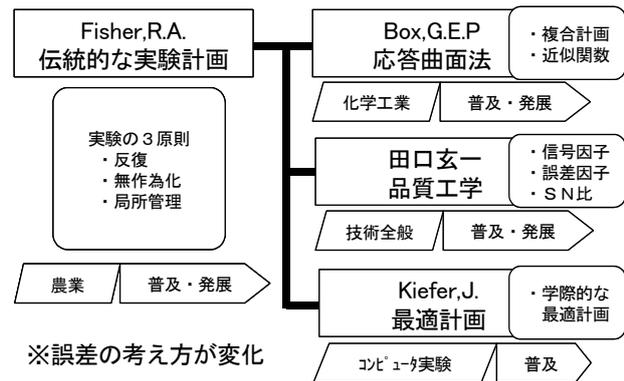
多目的特性達成のための効率的・効果的問題解決法

一方策系統図と応答曲面法の併用活用法

アイシン精機株式会社
花村 和男

1. はじめに

近年、SQC手法における実権計画法は、Fisher, R. A. が提示し、農業への適用で始まり、その後、乱塊法、ラテン方格、配置実験、分割法、直交実験などに発展を遂げている。1950年代には、化学工業での適用を意図して量的な因子に基づく計画としてBox, G. E. P. らにより応答曲面法が、また日本では田口により品質工学が、数学的な側面からKiefer, J. による最適計画が開発・提示され、新たな潮流が起きている。



(図1)

企業においては、要求品質の高度化・多様化、および低コスト化により、ますます高難度化する問題・課題解決のためには、伝統的な実験計画のみでなく、新たな潮流も研究し幅広い活用力をつけていく必要がある。

例えば、品質における多特性の最適化をはかる場合、一般的にそれぞれに効くと考えた要因を取り上げ、実験計画法を活用し最適な条件を設定する。しかし、品質と生産性というような異なった目的の多特性（ここでは多目的特性と言う）の目標を達成するためには、多回数、あるいは大規模な実験計画が必要となり、問題解決に多大な労力と費用がかかる。そこで、多目的特性達成のための効率的・効果的問題解決法を研究する必要がある。

本報告では、アーク溶接工程のスパッタ低減を研究の題材に、品質（外観）とスパッタ特性の多目的な3特性の最適化をはかる。その問題解決のプロセスにおいて、従来の要因系統図と実験計画による最適条件の設定のみでなく、方策系統図と応答曲面法による目標特性への合わせ込み、いわゆるチューニングを実践した結果、成果を得ることができたので、その実証科学的方法論を紹介する。

2. 多目的特性達成のための効率的・効果的問題解決法のアプローチ

2.1 多目的特性達成のための課題

多目的特性の目標を達成するためには、つぎのような課題が考えられる。(図2)

1) アイシン精機(株) 経営管理部門 TQM・PM推進室 主査 花村和男

〒448-8650 愛知県刈谷市朝日町2丁目1番地 TEL. 0566-24-8474 FAX. 0566-24-8816

- (1) 各目的特性に対する要因群の組み合わせが異なり、その中で全特性に影響を及ぼす共通要因と各特性にのみ影響する単独要因があるため、目標への合わせ込み（チューニング）に時間がかかる。
- (2) 各目的特性の変量が異なり（連続量、または離散量）、全体像が見え難く、最適なポイントを見失い易い。

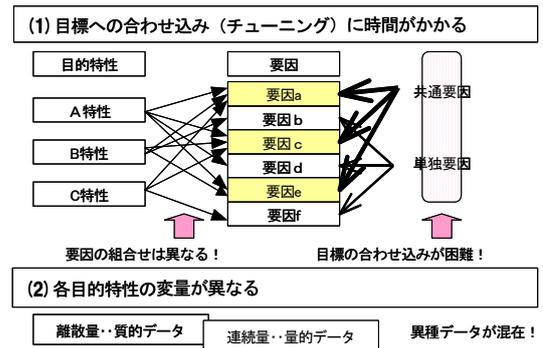


図2 多目的特性達成のための課題

2.2 効率的・効果的問題解決法の提案

そこで、対策の立案と実施のステップで、つぎのような問題解決法を考える。

- (1) 対策の立案のステップで、要因解析において絞り込んだ要因群に対し、共通要因、単独要因の順に最適化するための最短方策を、方策系統図で明確化する。
- (2) 対策の実施のステップで、共通要因に対して小規模な実験計画による最適化、つぎに最適化した水準の付近で多水準を設定して単独要因ごとに実験し、応答曲面法により探索し最適化する。

3. 応答曲面法による最適化

応答曲面法による最適化にはつぎの2つの方法がある。[1], [2], [3]

3.1 1特性の最適化

モデルに取り込まれている2つの量的変数（変量）と特性値との関係をグラフ上に等高線として表示し、曲面の形状や停留点（曲面の傾きが0となる点）や最適条件を視覚的に確認・検討する。（図3）

3.2 多特性の最適化

複数の目的変数（特性）を好ましいレベルにする方法で、「望ましき関数 $D(x)$ に基づくアプローチ（Desirability function）」を中心に解析し、最適条件を視覚的に確認・検討する。（図4）

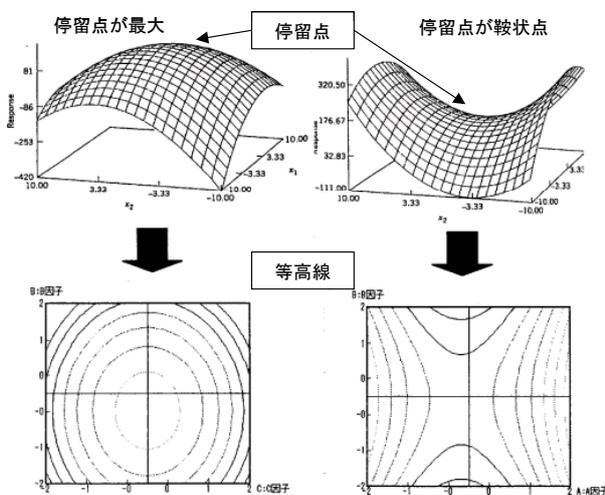


図3 応答曲面法:1特性の最適化

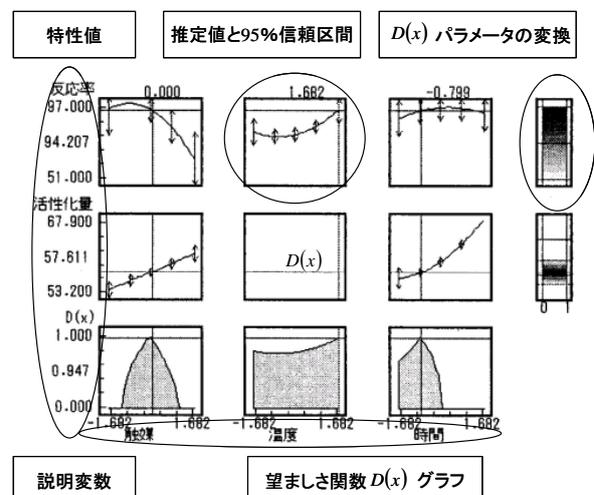


図4 応答曲面法:多特性の最適化

4. 研究テーマ

4.1 研究テーマの背景

生産技術部では、「グローバル競争に勝つ最良の品質・ミニマムコストの実現」をめざし、「商品・工法両軸でのコスト革新やモノづくり技術のレベルアップ活動強化」を展開している。その一環として、「号口工程の技術的な改善によるロスの低減」を基に、「現場の問題解決に直結した工程・設備の差別化」をはかることが必要である。

4.2 研究テーマのねらい

自動車用シート商品では、軽量化、高強度化の要求品質を満足しつつ、低価格化要求に対応するため、これまでのボルト締付やかしめ接合から、部品を削減できるアーク溶接による締結方法に変更し、「新骨格シート」を商品化している。(図5)

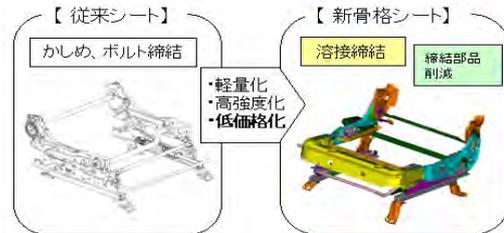


図5 新骨格シートの商品化

しかし、アーク溶接工程では当然スパッタが発生し、このスパッタ品質不具合防止のためのスパッタ除去作業工数ロスが増加傾向であった。

そこで、この生産ロス低減により新商品に適応した工程・設備の確立をはかるため、「アーク溶接工程スパッタ低減」に取り組んだ。

5. 現状把握と目標の設定

現状の生産性指標としての可動率は 80%で、その中で不動時間が 12%を占めていた。この不動時間の内訳は、約 50%がスパッタ除去時間であり、まずこの低減目標をつぎのように設定した。

(1) スパッタ除去時間：80%低減

(2) 可動率：6%向上 (スパッタ低減活動分)

6. 要因の解析

6.1 要因の洗い出しと絞り込み

スパッタ発生要因を系統図で整理し、影響度と実現性で評価し、6 要因を抽出した。さらに、「スパッタ発生」と「溶接品質」への影響度合をT型マトリックス図により整理した結果、スパッタ発生要因は溶接品質に影響が大きく、溶接品質を満足する範囲で最適な条件を設定しなければならないことを明らかにできた。(図6)

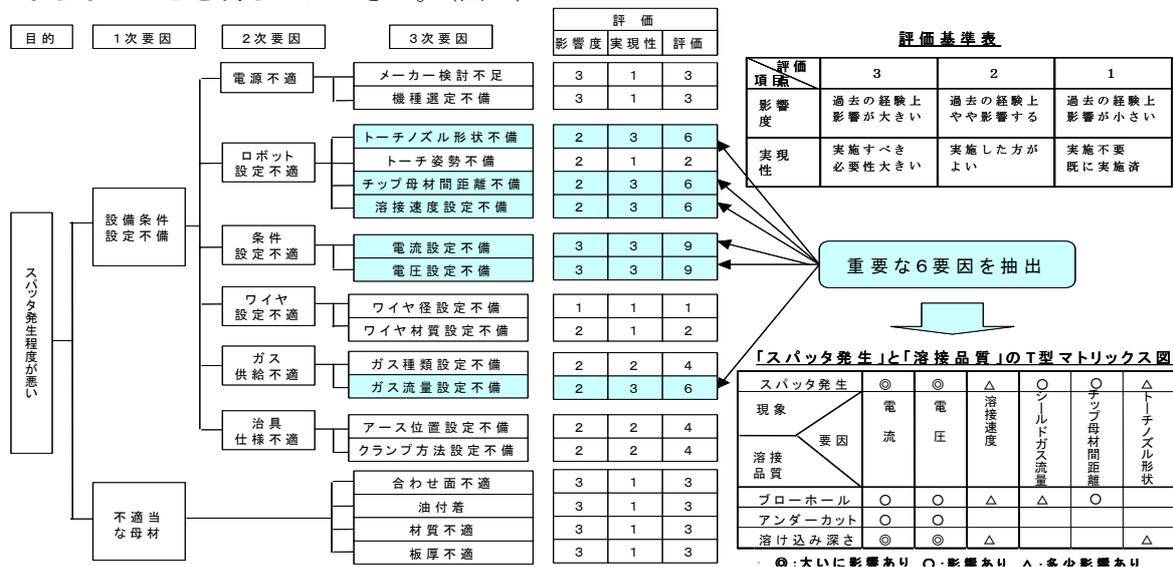


図6 要因の洗い出しと絞り込み(要因系統図)

6.2 変動要因の抽出と削除

抽出した 6 要因について機差を調査した結果、「シールドガス流量」、「チップ母材間距離」、「トーチノズル形状」の 3 要因については、条件設定に変動（違い）があった。そこで、3 要因については、比較実験評価を行い最良な条件に統一することにより変動要因を削除した。（図 7）

しかし、統一後でもスパッタ発生量を極小にできず、根本的に現状の溶接機自体の設備改善が必要であると考えた。

6.3 発生メカニズムの追求と課題の明確化

設備改善を進めるために、「何故既存のショートアーク溶接機でスパッタが発生するか」について、加工点を可視化する中で、その発生メカニズムを追求した。その結果、スパッタの多くは、「ワイヤと母材が接触し短絡すると、短絡通電時に接触抵抗と固有抵抗で発熱し、ワイヤが溶融してアークが発生し、その時に爆破し発生する」ことが確認できた。（図 8）

また既存のショートアーク溶接機では、電源自体、短絡が繰り返される機種であり、スパッタ発生をなくすためには、短絡レス化が課題であることが明確になった。

変動要因の比較実験評価結果

| 要因 | A トーチノズル形状 | | B チップ母材間距離 | | | C ガス流量 | | |
|--------|------------|------|-------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|
| | ストレート | 先端細り | 12mm (やや短い) | 15mm (通常) | 20mm (やや長い) | 15ml (やや少ない) | 20ml (通常) | 25ml (やや多い) |
| スパッタ状況 | ○ | × | △ | ○ | × | △ | ○ | △ |
| 備考 | | | | | | 差異がないため通常を選択 | | |

統一 → スパッタ発生極小化できず! → 設備改善が必要!

図7 変動要因の抽出と削除

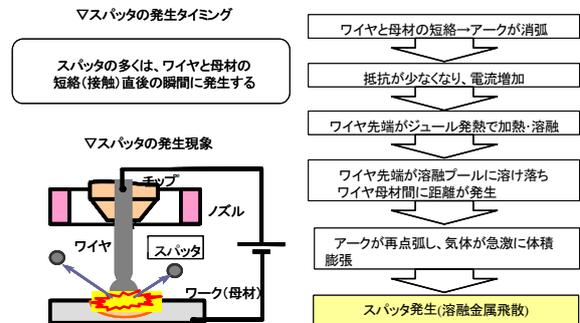


図8 スパッタ発生メカニズム

7. 対策の立案

これらの対策の進め方を方策系統図により検討し、つぎの3つの対策事項を決定した。（図 9）

- ①設備の改良の追求と変更：ショートアーク溶接機からパルス溶接機への変更に伴う事前トライ
- ②改良後の評価実験による最適条件の設定：実験計画法活用による最適化
- ③多目的特性のチューニング：応答曲法を活用した最適化



図9 対策の立案(方策系統図)

8. 対策の実施

8.1 設備改良の追求と変更

ショートアーク溶接機は、電源自体、短絡が繰り返される機種であった。そこで短絡レス化をはかるためパルス溶接機に変更した。パルス溶接機は、スプレー移行（短絡レス）、つまり1回のパルス（1周期）で1滴の溶滴を落下させる「1パルス1ドロップ」で溶接するも機種であり、ワイヤと母材の接触が極力さげられ短絡レス化が可能と判断した。（図10）

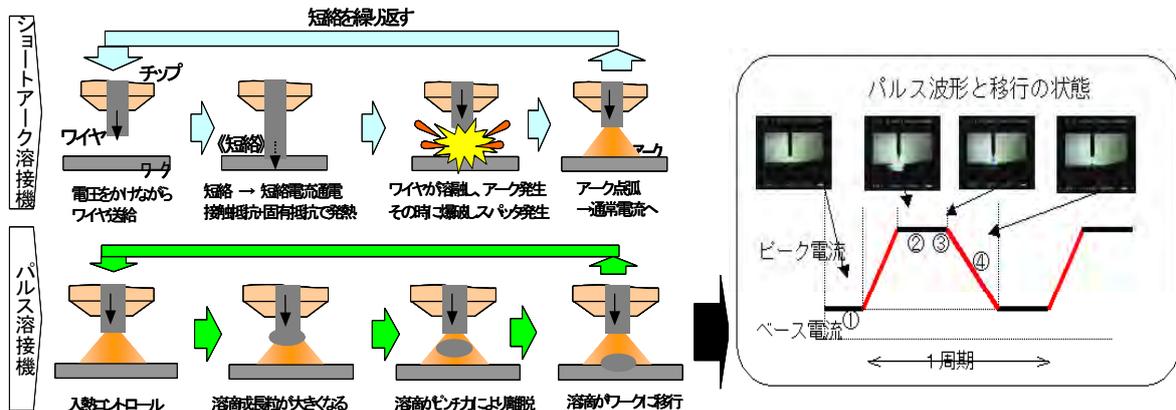


図10 ショートアーク溶接機とパルス溶接機の違い

しかし、溶接開始および終了時点でのワイヤと母材の接触は避けられず、スパッタの発生が懸念されるため、この事前トライを行った。

パルス溶接機のもう一つの利点は、電圧と電流の波形データが採取できることであった。そこで、事前トライの際にスパッタの波形データを採取し、スパッタ量と短絡回数の相互関係を見た。

その結果、相関が認められ、スパッタをなくすには、代用特性として短絡回数を無くせばよいことが確認できた。（図11）

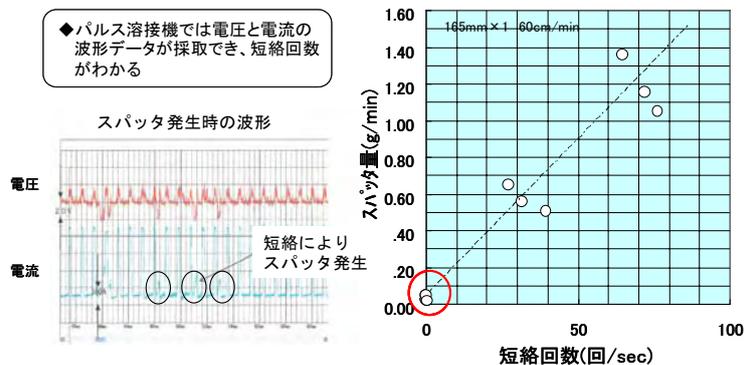


図11 パルス溶接における短絡回数とスパッタ量の関係

8.2 改良後の評価実験による最適条件の設定

改良後のパルス溶接機における最適条件を設定するため、実験計画法を活用して評価実験を行った。実験は、「短絡回数」を特性値とし、溶接品質とスパッタ発生の共通要因で大いに影響するある「A：電流」、「B：電圧」を（図5を参照）、他にパルス溶接機の設定条件として「C：波形形状」を選定し、この3因子を3水準に振り、L₉直交表による直交実験を行った。実験結果の解析は、静特性のSN比（望小特性）に変数変換して分散分析を行った。

その結果、要因Aが有意で「A 2」が最適であることがわかった。また他の条件はSN比の大

小さい（ばらつきの小さい）「B 3、C 3」を設定した。利得の計算結果 6db で、この条件でやればスパッタ短絡回数のばらつきも 1/2 にできることがわかった。（図12）

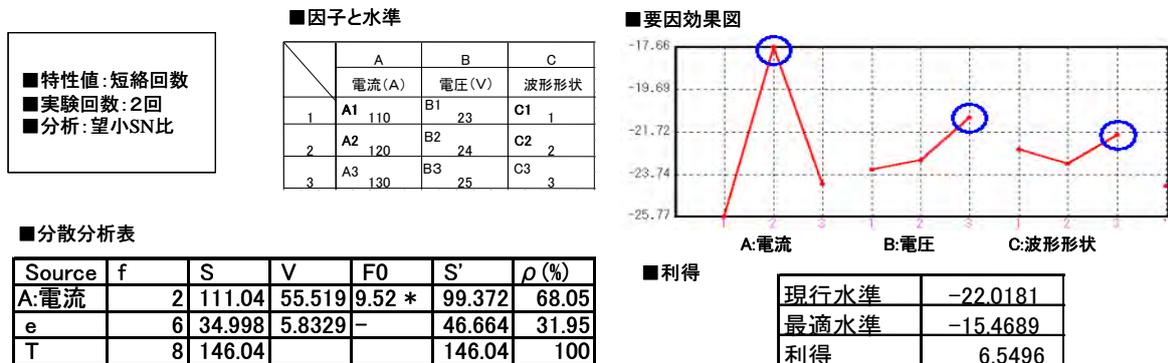


図12 実験計画法による最適条件の設定

8.3 多目的特性のチューニング

スパッタ低減ができる条件をもとに、最終的な品質と生産性向上をねらいに、生産性を向上させるための「溶接速度」によるチューニングを行った。この場合、「溶接速度」のレベルごとに、前述の実験で得られた最適条件の付近で多水準を設定して評価実験を行った。そして、「応答曲面法」を活用して探索と最適化を行った。

この場合の評価特性は、「品質（外観）」とスパッタ発生に関係の深い「短絡回数」、および「スパッタ程度」の3特性とした。しかし、各特性のデータの性質が異なるため、すべてダミー変数として数量化して解析した。

解析においては、まず「多特性の最適化」を、パソコン解析ソフト[6]を用いて行った。3特性「品質（外観）、短絡回数、スパッタ程度」を目的変数に、3因子「電流、電圧、溶接速度」を説明変数に、多特性の最適化を行い、「溶接速度」の望ましき関数が1に近くなる領域に最適化した。（図13）

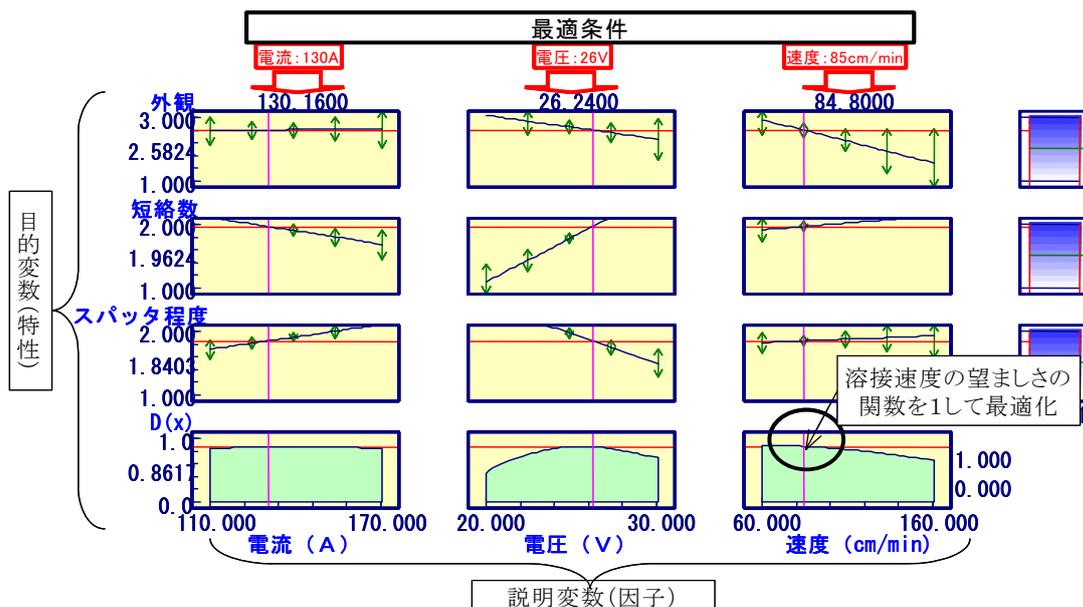


図13 多特性の最適化による最適化グラフ

この結果をもとに関係者に説明したが、説得するのに時間を要した。そこで、一目でわかってもらえるものが必要と考え検討した結果、多目的特性のすべての特性をダミー変数として数量化して基準化してあるのだから、それぞれに「1特性の最適化」を行い、それらを合体させる方法があることを思いついた。

具体的には、「溶接速度=85cm/min」を一定にし、「品質(外観)」、「短絡回数」、「スパッタ程度」ごとに、「電流」と「電圧」の最適化グラフを作成し、これらを合体することと総合的に一目で分かる最適化グラフを得ることができた。(図14)

この結果、最適な範囲の中の中央値として、「溶接速度=85cm/min」の場合、「電流=130A」、「電圧=26V」が最適条件であることが説明でき、関係者に理解が得られた。

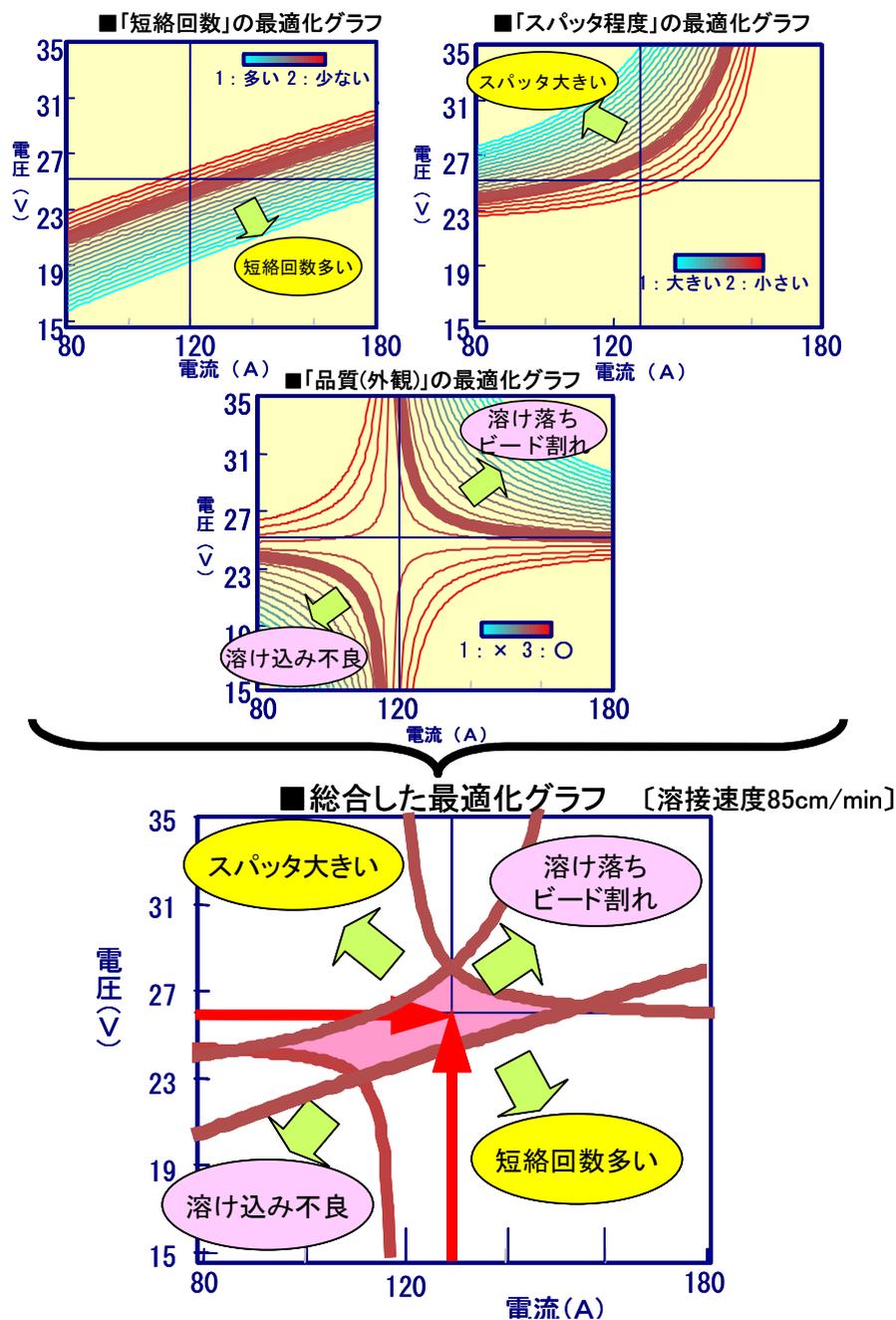


図14 1特性の最適化により多目的特性を総合した最適化グラフ

8.4 確認実験

前述で得られた最適条件で確認実験を行った結果、スパッタ発生量極小の実現ができた。

図15に、パルス波形での結果、およびスパッタ付着状態の対策前後の比較を示す。

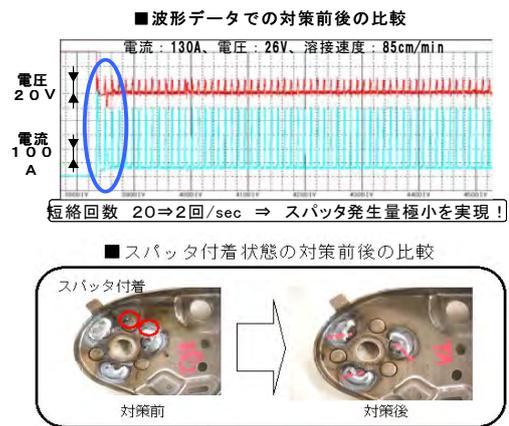


図15 確認実験結果

9. 目標達成度の確認

目標達成度は、図16に示すように、目標にはほぼ達成でき、工数低減、可動率向上の実現ができた。

- (1) スパッタ除去工数：72%（目標 70%低減）
- (2) 可動率：7%（目標 6%向上）

10. 標準化

新機種のパルス溶接機において、つぎのような標準化ができた。

- (1) パルス溶接基盤の他設備への水平展開
- (2) ティーチング時のワイヤ長さ統一治具の作成
- (3) 条件設定方法ノウハウシートの作成

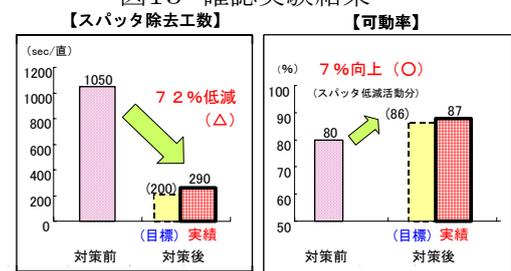


図16 目標達成度の確認

11. まとめ

この研究により、スパッタ発生を極小にでき、品質不具合防止をはかる中で、生産性向上に結びつけることができた。

また、品質と生産性を高めるためには、方策系統図により攻め方を工夫し、実験計画法のみでなく、新たな潮流である応答曲面法を活用した多目的特性のチューニングにより、効率的・効果的な問題解決ができることがわかった。

【参考文献および解析ソフト】

- [1] 山田 秀：「最適計画と多特性の最適化」, 日科技連DEテキスト, No.6, 2000.9~200.11
- [2] Khuri & Cornell：「Response Surface」, MARCEL DEKKER, INC., 1987
- [3] Myers & Montgomery：「Response Surface Methodology」, John Wiley & Sons, Inc., 1995
- [4] 山田 秀：「コンピュータ上の実験の計画と解析」, 品質, VOL. 34, No.2, 25-29
- [5] 山田 秀：「コンピュータシミュレーションのための実験計画法— 1 様実験計画と過飽和実験計画—」, 品質, VOL. 34, No.3, 21-29
- [6] JUSE-StatWorks Ver. 3.5 (株)日科技研

掲載されている著作物の著作権については，制作した当事者に帰属します。

著作者の許可なく営利・非営利・イントラネットを問わず，本著作物の複製・転用・販売等を禁止します。

所属および役職等は，公開当時のものです。

■公開資料ページ

弊社ウェブページで各種資料をご覧ください <http://www.i-juse.co.jp/statistics/jirei/>

■お問い合わせ先

(株)日科技研 数理事業部 パッケージサポート係 <http://www.i-juse.co.jp/statistics/support/contact.html>