

ステンレス鋼の電解研磨加工における加工条件の最適化^[1]

Optimization of Electro-polishing Conditions for Stainless Steel

有限会社 増田技術事務所

代表取締役 増田雪也

(info2qe@po27.lcv.ne.jp)

電解研磨加工は、平滑性に優れた加工面が得られる等のメリットがある。ワークはそれぞれの形状により、加工条件を調整する必要があるが、加工条件が与える影響について検討されている例は少なく、経験により決定されているケースが多い。

そこで本研究では、品質工学を用いてオーステナイト系ステンレス鋼の電解研磨加工における最適条件を検討した。その結果、研磨電圧、陰極面、陰極面直径および研磨液循環流量が、SN比および感度に対して大きな影響を与えることが明らかとなった。また、最適条件では電解研磨液の劣化による影響をほとんど受けずに研磨加工をすることができた。

キーワード：タグチメソッド、パラメータ設計、ロバストデザイン、品質工学会

Key Words：Taguchi Methods, Parameter Design, Robust Design, Quality Engineering Society

1. 緒言

電解研磨は、加工変質層や残留応力が発生しないことや平滑性に優れていることなどの理由により、化学、医療、バイオ関連の設備向けの表面処理として需要が高い。近年では、高いクリーン度が求められる液晶や半導体関連での需要が拡大している。

特にステンレス鋼の電解研磨については、素材自体の耐食性が優れているため、この電解研磨加工と組み合わせることにより、高い耐食性を得ることができ、微細医療器具やクリーンルーム用関連製品の表面処理として利用されるケースが多い。

電解研磨はめっきと逆のプロセスで研磨が行われるが、ワーク形状に最適な研磨加工条件を選定する必要があり、経験による専門的な知識が不可欠である。しかし、この技術に関して詳細な検討を行った事例は少ない。つまり、研磨加工条件を変化させたとき、研磨量に対してどのような影響が発生するかについては不明点が多い。

また、実際の電解研磨加工において問題となるのは、研磨液の劣化である。電解研磨液は、研磨加工の進行と共に劣化し、品質に悪影響を与えるようになるが、たとえ研磨液が劣化したとしても、ある程度の品質以上の研磨加工を行うことができれば、研磨液の長寿命化により、研磨加工コストを低く押さえることが可能となる。

そこで本研究では、電解研磨液の劣化による影響を最小限にとどめ、バラツキが小さく、しかも効率よく研磨できる最適加工条件を求めるために、過塩素酸アルコール液を用いたオーステナイト系ステンレス鋼の電解研磨加工について種々の実験を行った。

2. 電解研磨の概要

電解研磨は、金属の表面をミクロン単位で電気化学的に溶解する表面処理である。原理的には、陽極溶解の速度が、溶解した金属イオンの拡散速度よりも大きいため、表面付近に液体皮膜が生成され、表面の凸部では液体皮膜が薄く、液体皮膜の抵抗が凹部より小さいために、陽極電流は凸部に集中し、選択的に溶解されることから表面が平滑に研磨される。一般的には過塩素酸系の電解研磨液が優れており万能液として使用されている。

3. 品質工学的検討

3・1 基本機能の検討

図1に入出力の関係を示す。ファラデーの法則により、電解研磨の理論式は次式のようになる¹⁾。

$$w = \frac{MIt}{nF}$$

ここでwは研磨量、Mは原子量、Iは電解研磨時の電流、tは電流を流した時間、nは原子価、Fはファラデー定数

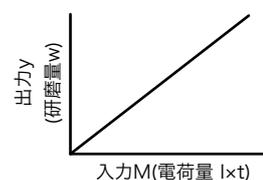
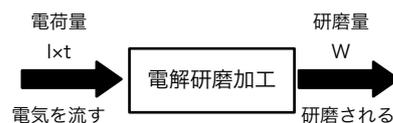


図1 入出力の関係

表1 誤差因子

誤差因子	水準	
	新液 (新液)	劣化液 (2160C分の劣化)
劣化		

である。M、nおよびFは定数であるので、研磨量wおよび電荷量(Ixt)は比例関係となる。よって、電荷量Mと研磨量yがゼロ点比例することを基本機能とした。

3・2 信号因子および特性値

信号因子として電荷量Ixtを3水準 (30C,60C,90C) 設定した。図2に電圧6Vおよび12Vで電解研磨を行った時の電流変化の様子を示す。設定電圧により電流のパターンは異なるが、電荷量はこの電流を積分することにより求めた。

特性値としての研磨量は、電子天秤を用いて、電解研磨前後の試験片重量の差として求めた。

3・3 誤差因子

電解研磨液の劣化にかかわらず、安定した研磨ができることが理想である。しかし、現実的には劣化により様々な弊害が発生する。これは研磨の進行につれて、研磨液中の水素の消耗により電導度が減少したり、pHが増大するなどの現象が発生することに起因すると考えられている。そこで今回は、劣化の影響がなるべく小さくなるような研磨加工条件を求めるために、研磨液の劣化を誤差因子として設定した。

表1に誤差因子を示す。劣化液は、新液での実験が終了した後、両極にダミーのステンレス板 (30mm×30mm×1mm) を取り付け、電解研磨 (研磨電圧12V、研磨液循環流量「中」、電極間距離20mm、研磨液冷却方法「流水」、陰極面「両面」) を行い、表2で示す制御因子に設定したA液、B液およびC液のそれぞれについて、2160C分の劣化を施した。これはL18直交表の新液での実験により、A液、B液およびC液はそれぞれ1080C分の劣化になることから、その2倍分の劣化となるように2160C分の劣化を設定した。なお、新液については無色透明であるが、劣化液は溶出した金属イオンの影響により、黄色の透明な状態に変化した。

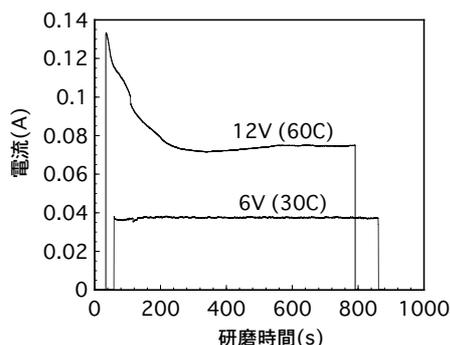


図2 電解研磨時の電流変化

表2 制御因子

制御因子	水準		
	1	2	3
A 研磨液冷却方法	流水	氷水	
B 研磨液グリセリン濃度	A液	B液	C液
C 電極間距離(mm)	10	20	30
D 研磨液循環流量	遅	中	速
E 陰極面直径(mm)	10	20	30
F 陰極面	オモテ面	両面	両面
G 研磨電圧(V)	6	12	18

表3 電解研磨液の組成

	A液	B液	C液
エチルアルコール(ml)	750	700	650
グリセリン(ml)	150	200	250
過塩素酸(ml)	40	40	40

3・4 制御因子

表2に制御因子を示す。L18直交表に7因子を割り付けて実験を行った。

表3に電解研磨液の組成を示す。この中で、過塩素酸は電解研磨作用の重要な成分である。グリセリンおよびエチルアルコールは、その配合比率によって、研磨液の粘度を変化させると同時に、電解研磨の際に試験片表面に発生する液体被膜の厚さを変化させる。この液体被膜の厚さは、研磨効率および研磨面粗さに重要な影響を与えると考えられている。よって、これらの影響を検討するために、過塩素酸の濃度を同一にして、グリセリンおよびエチルアルコールの配合比率を変化させた。また、過塩素酸の混合物は爆発の危険があるため、研磨液の流動および冷却に対して十分な注意をする必要があり、流水または氷水を用いて研磨液を冷却した状態で実験を行うと共に、これらの因子も制御因子として設定した。

試験片表面での電流密度は、研磨量に大きな影響を与える¹⁾。この電流密度に係る因子として、電極間距離、陰極面直径、陰極面 (オモテ面のみ使うか、または両面を使うか) および研磨電圧を設定した。

研磨液循環流量は、研磨された金属イオンが迅速に試験片表面から運び去られる効果を検討するために設定した。

4. 実験方法

4・1 試験片

試験片にはオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) を用いた。φ10mmの丸棒から1mm厚の試験片を切り出し、耐水研磨紙 (#320) にて端面の仕上げを行った。この耐水研磨紙による研磨後に、電子天秤により全試験片の重量測定を行い、電解研磨前の重量とした。

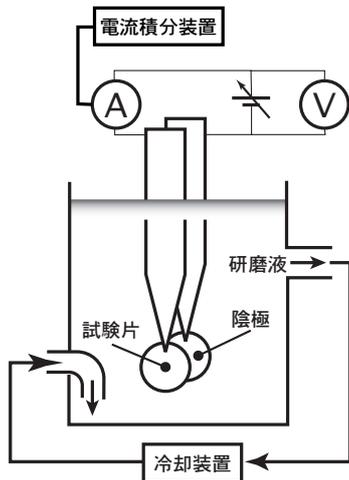


図3 実験装置

4・2 電解研磨装置

実験装置の概要を図3に示す。φ65mmのピーカー内で電解研磨が行われる。研磨液は冷却装置を通り循環する構造になっている。循環に用いるポンプモーターの定格流量は、9l/min (60Hz) である。直流電源装置により周波数変換を行い、ポンプ流量を変化させ、3水準の流量を設定した。冷却装置は、ガラス製の螺旋管を冷却槽内に設置して行う構造になっている。この冷却槽には、流水または氷水を入れて冷却を行うが、この時の電解研磨液の温度は、流水時12°C、氷水時4°Cであった。

試験片および陰極は、SUS304製のピンセットで研磨液中に保持した。両極のピンセットには直流電源からの電圧がかけられており、これにより電解研磨を行った。電圧計および電流計により、電解研磨時の電流および電圧測定を行った。また、電流計は電流積分装置に繋がっており、これにより電荷量の測定を行った。

ピンセットが研磨液と直接接する部分は、陽極または陰極として作用してしまう。これを防ぐために、ビニールテープおよびゴム系接着剤を用いてピンセットにマスキングを施した。但し、試験片に電気を流す都合上、ピンセットが試験片を掴む部分については露出させたままとなっているが、微小な面積であることから実験に与える影響は少ないと判断した。

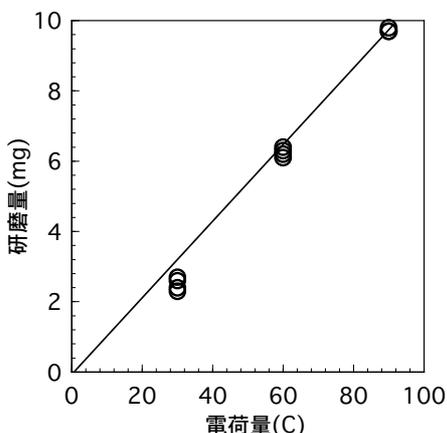


図4 予備実験結果

5. 予備実験

L18直交表による実験を行う前に、電荷量と研磨量とが比例関係になるかを確認するために、予備実験を行った。また同時に、誤差因子および制御因子で取り上げた因子の他に、実験に重要な影響を与える因子の有無についても確認を行った。

図4に予備実験での電荷量および研磨量の関係を示す。誤差因子および制御因子を図中の条件に固定して、4回の繰り返し実験を行った。なお、この予備実験では、本実験とは形状が若干異なる試験片を用いた。

電荷量30Cにおいて、多少のばらつきが見られるが、全体としては直線性も良く、ばらつきも少ない。よって、比例関係は成り立っており、また、この他に重要な影響を与える因子の設定にも漏れがないと判断し、L18の実験に進んだ。

6. 実験結果

6・1 測定データ

図5にL18直交表による実験のうち、1行目および12行目の測定結果を示す。

1行目(SN比 = -19.64db)は、誤差因子の影響により大きなバラツキが発生している。また、直線性も悪い。一方、12行目(SN比 = -10.13db)は、誤差因子の影響が比較的小さく、直線性も良好である。この二つの実験結果の違いは、制御因子のパラメータの違いにより、誤差因子の影響の受けやすさに差があることを意味している。

6・2 要因効果図および利得の再現性

図6に要因効果図を示す。この結果から、最適条件および比較条件を以下のとおり設定し、確認実験を行った。

最適条件 A2B3C1D3E2F2G2

比較条件 A1B1C2D2E1F1G1

表4に利得の再現性を示す。SN比は20.11dbに対して27.23dbとなりほぼ再現していると言える。

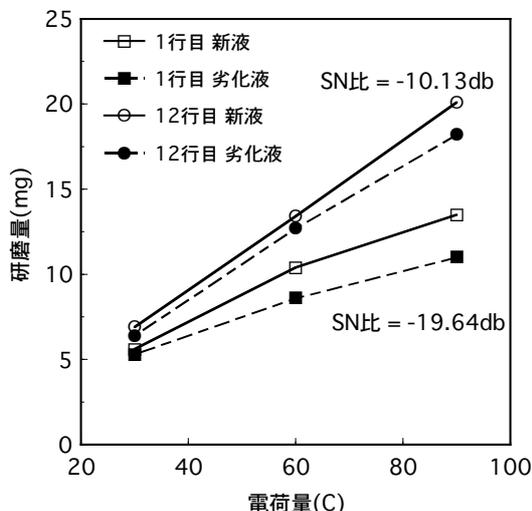


図5 1行目および12行目の実験結果

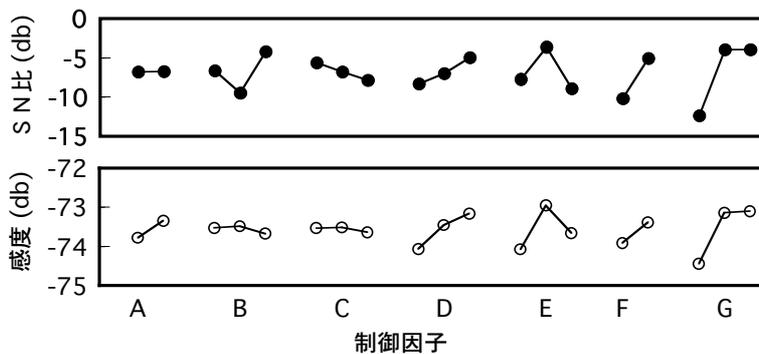


図6 要因効果図

7. 電解研磨加工への適用

7・1 最適条件の選択

以上の結果を踏まえて、電解研磨加工における最適条件を検討する。

SN比が高いことはもちろん重要であるが、感度についても、研磨効率の向上の観点から高いことが望ましい。よって、SN比と感度が同じ傾向を示す因子C、D、EおよびFについては共に高い水準を選ぶことにした。

研磨電圧(因子G)については、12Vおよび18Vでは共に同程度のSN比および感度となる。電圧を高くしても効果と同じであるので、12Vを選択した。また、研磨液冷却方法(因子A)については、SN比は同程度であるが、氷水の方が感度が高い。よって、研磨効率に優れる氷水を選択した。研磨液グリセリン濃度(因子B)は、感度による差はほとんどないため、SN比が高いC液を選択した。

以上のことから、最終的にここで選択した条件は、確認実験での最適条件と一致しており、SN比= 6.92dbの電解研磨加工を行うことが可能となった。

図7に確認実験で行った最適条件および比較条件での電荷量と研磨量の関係を示す。比較条件では、誤差因子によるバラツキが発生しており、直線性も悪い。しかし、最適条件では、誤差因子による影響が全くない。また、直線性も非常によいことが分かる。

7・2 基本機能の妥当性

実験の結果から、電荷量および研磨量の関係を基本機能としたことは妥当であった。よって、電解研磨加工の最適条件を求める際は、この基本機能を利用することができるということが明らかとなった。また、電解研磨はめっきとは逆のプロセスであるため、めっき加工においても、この基本機能が利用できると考えられる。

また、過塩素酸系研磨液を用いた電解研磨加工は、優れた研磨能力を有しているにもかかわらず、前述したような爆発性を有するために、現在、工業的には行われていない。しかし、どのような成分の研磨液を用いる場合でも、今回の実験で基本機能とした電荷量および研磨量の関係は成立し、品質工学による最適条件の検討が可能であると考えられる。

表4 利得の再現性

	SN比 η (db)		感度 S (db)	
	推定	確認	推定	確認
最適条件	3.46	6.92	-72.13	-74.05
比較条件	-16.65	-20.31	-74.85	-78.23
利得	20.11	27.23	2.71	4.18

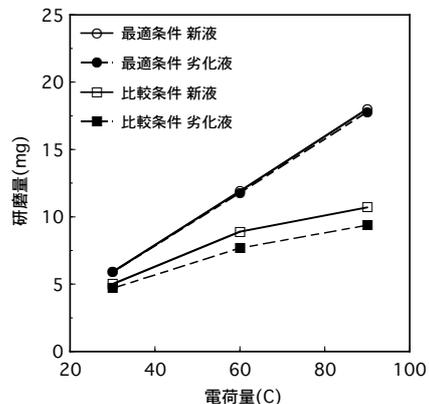


図7 最適条件および比較条件

8. 経済効果

経済的な効果については、研磨液の劣化による影響を受けにくい最適加工条件を得ることができたため、研磨液の寿命を延ばすことができると考えられる。また、電荷量と研磨量は直線性のよい比例関係となるため、所望の研磨深さでの加工が容易になる。よって、以前行っていた予備加工を省くことができるため、従来の約半分の時間での加工が可能となる。

9. 結言

過塩素酸アルコール液を用いたオーステナイト系ステンレス鋼の電解研磨加工における最適条件について、品質工学を用いて検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 最適研磨条件を明らかにすることができた。研磨電圧、陰極面、陰極面直径および研磨液循環流量は、SN比および感度に対して大きな影響を与えた。
- (2) 最適条件では、誤差因子（電解研磨液の劣化）の影響をほとんど受けないために、バラツキが小さく、しかも直線性のよい電解研磨加工をすることができた。
- (3) 経済的な意味において、電解研磨液の長寿命化および予備加工省略による加工時間の短縮化が可能となった。

本研究は長野県品質工学研究会の事例研究として実施した。

参考文献

- 1) 佐藤敏一編著：金属エッチング技術, 榎書店, pp.17-20(1973).