



電解砥粒研磨による鋼材の精密鏡面仕上げ

© 1986 ISIJ

清 宮 紘 一*

Precision Mirror Finish of Steel Materials with Electrochemical Abrasive Polishing

Koichi SEIMIYA

1. はじめに

鉄鋼製品に美しい金属光沢を与えるための鏡面仕上げ工程には従来バフ研磨が用いられ、大部分はステンレス鋼が対象である。しかし、このバフ研磨は作業者の熟練を必要とする自動化の難しい工程である。また研磨に伴う大量の粉塵にさらされるうえ、研磨後の酸洗工程のように非衛生的な作業環境から若年労働者が避ける傾向にあり、作業者の高齢化が目立つなど将来が心配されている。さらに、研磨性能の面からみても、バフ研磨には砥粒の残留や砥粒痕の発生がつきものであり、形状精度を必要とする製品への適用は難しく、ハイテク時代にそぐわない。

一方、金型のように形状精度が必要な製品の鏡面仕上げは熟練者の手作業によるラッピング工程に依存しており、より能率的で自動化も可能な研磨法が望まれている。

さて、電解砥粒研磨は中性塩の電解液を使用し、粉塵発生のない安全で衛生的な新加工法である。手動方式の研磨機はごく軽量で誰でも手軽に操作でき、とくに熟練を必要とせず、パートの女性でも鏡面仕上げ作業が可能である。自由曲面はじめ各種の形状への適応性もち、サブミクロン精度の精密品への適用も可能であり、自動化も簡単にできるなど多くの長所をもつ有望な加工法であり、生産現場にしたいに普及することが予想される。

2. 電解砥粒研磨の原理

電解を利用して金属を研磨する方法としては、よく知られた電解研磨のほか、砥粒加工を複合した電解ラッピングがある。電解研磨では、工作物をアノードとして電解液中に浸漬し、その表面の微小凹凸の凸部の電解溶出量が凹部よりも大きくなる加工条件で研磨を行う。しかしこの方法は、電解液中に強酸や強アルカリが含まれるので作業に危険を伴うほか、取しろが大きくなり研磨に長時間を要し、加工量の制御も困難であるため、形状精

度を必要とする工作物には適用できない。

電解ラッピングは、数 10 A/cm^2 の高電流密度条件下の高速加工を目的とし、加工量の大部分を電解に依存する。しかし、電解溶出が砥粒加工とは独立に作用し、凸部と凹部の電解溶出量に差がないため、電解は平滑化に寄与せずかえって形状精度を悪化させる要因になる。きずや加工変質層の除去のため大きな取しろを必要とする場合は別として、一般の加工には実用上問題がある。

電解砥粒研磨は電解ラッピングと外見上非常によく似ており、広義の電解ラッピングと見なすことも可能であるが、平滑化と形状精度の維持に不動態皮膜をうまく利用しているのが重要な相違点になる¹⁾。電解砥粒研磨には通常 20% 硝酸ソーダ水溶液が用いられ、この電解液はステンレス鋼に対して図 1 のような電流効率-電流密度特性を示す。電解砥粒研磨に適用される 1 A/cm^2 前後の低電流密度範囲では、安定した不動態皮膜に保護されたアノード金属はほとんど溶解せず、電流の大部分は無効電流になるため電流効率がゼロに近い値にまで低下している。ここで、砥粒により皮膜が除去されて下地金属が露出すると、その部分の電流効率は一時的に 100%

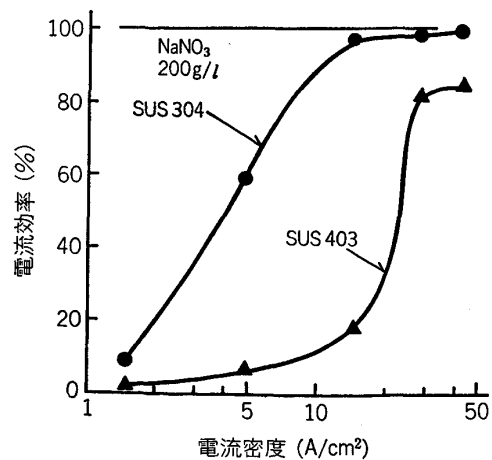


図 1 電流効率-電流密度特性

昭和 60 年 12 月 6 日受付 (Received Dec. 6, 1985) (依頼解説)

* 工業技術院機械技術研究所 (Mechanical Engineering Laboratory, Agency of Industrial Science and Technology, 1-2 Namiki Sakura-mura Niihari-gun Ibaraki pref. 305)

近くまで上昇し金属溶出量は急増大する。これは、砥粒の衝突する確率の大きい凸部では電解溶出量も凹部よりはるかに大きくなることを意味し、電解と砥粒加工が相乗的に平滑化に寄与する理想的な研磨が可能になる。また、取しろは表面粗さと同程度でよく、電解研磨や電解ラッピングよりも1桁小さい値になるため、形状精度の維持も容易である。

3. 砥粒と研磨材

砥粒の保持方式には固定砥粒、遊離砥粒の両方式があり、前者ではフェノール系の含浸樹脂で砥粒（アルミナ、炭化けい素など）を分散固着したナイロン不織布、後者ではスポンジ状のポリウレタン材を研磨材に用いる。ナイロン不織布は工業用、家庭用に広く市販されており、#150～#1500の数種類の粒度のものが用意されている。当初の厚さは約10mmであるが、40kPa程度の適正な押付圧を加えると約2mmになり、この程度の電極間げきでは数Vの極間電圧で電解砥粒研磨に適した1A/cm²前後の電流密度がえられる。粒度番号の大きいものほど通液性がよい。研磨材はナイロン繊維の摩耗によりしだいに厚さが減少し、それとともに砥粒加工量も低下する傾向があるが、摩耗特性が加工条件に複雑に依存するため定量的なデータはない。平面研磨の場合には十数時間の使用が可能であるが、細かい凹凸面での寿命はかなり短い。

一方、電解液中に砥粒と混入する遊離砥粒方式（研磨材は砥粒を含んでいない）では、通液性の悪い布パフタイプの研磨材も使用されているが、フィルター機能を兼備して一定粒径以上の砥粒やごみを加工域に入れず、押付圧が加えられた状態での砥粒保持能力および砥粒供給の均一性もよいウレタン研磨材の方が優っている。寿命もナイロン不織布よりはるかに長い。砥粒濃度はある程度以上のレベルなら加工速度に影響しないが、電解液循環系の途中で沈殿堆積することを考慮して多目に混入するのが安全である。濃度レベルの下限は、#2000アルミナ砥粒で10g/l、#6000砥粒では5g/l程度とみられる。

固定砥粒方式は研磨材による砥粒の保持力が強いので、砥粒の工作物への切込量が大きくなり加工速度は大きいですが、仕上げ面粗さは相対的に悪くなる。したがって、0.2～0.3μm R_{max}程度の粗さの準鏡面に仕上げる研磨工程に向いており、この加工面をさらに0.1μm R_{max}以下の完全鏡面にする工程には遊離砥粒方式が適している。いずれの方式でも、砥粒を支持する研磨材の粘弾性特性がこの研磨法を成立させる重要な因子である。

4. 仕上げ面の粗さと諸性質

図2は固定砥粒方式における、下地面から最終仕上げ面に至るまでの工作物表面粗さの改善特性を示す。図3

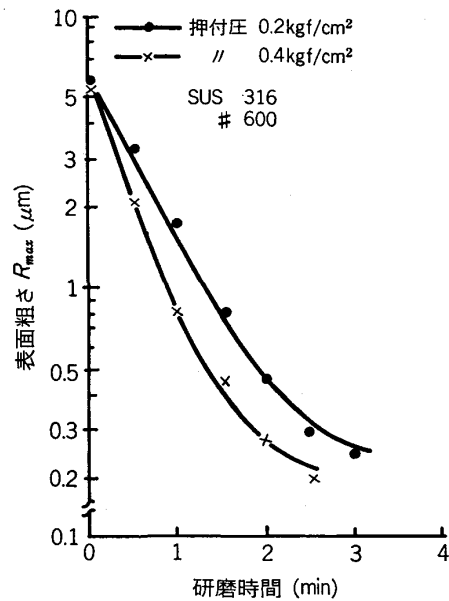


図2 固定砥粒方式での表面粗さ改善特性

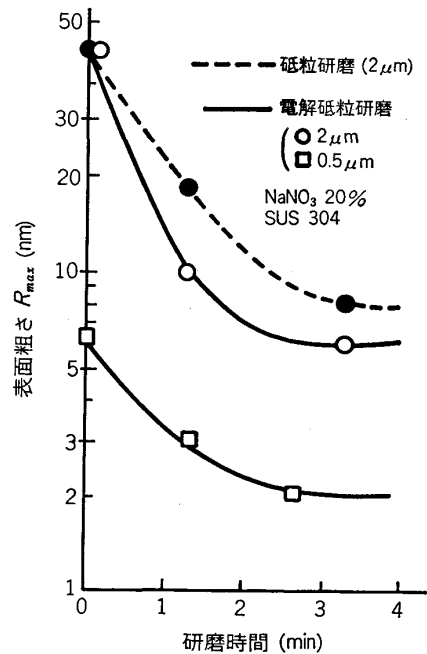


図3 遊離砥粒方式での表面粗さ改善特性

は遊離砥粒方式の場合の表面粗さ改善特性である²⁾。電解砥粒研磨の仕上げ面粗さは、砥粒による除去量と電解による溶出量のバランスに依存し、遊離砥粒の場合には、図4に示すような仕上げ面粗さを最小にする最適電流密度範囲が存在する。これ以上の電流密度ではピットの発生により粗さが電流密度とともに急増大する。固定砥粒方式では最適電流密度範囲は見当たらず、電流密度とともに粗さが増大する。図5は仕上げ面粗さに及ぼす砥粒径の影響を示す。工作物の仕上げ面粗さをよくする主要な目的のひとつに液体中でのスケールや気体中の粉体の付着を抑制する効果があげられるが、SUS 316

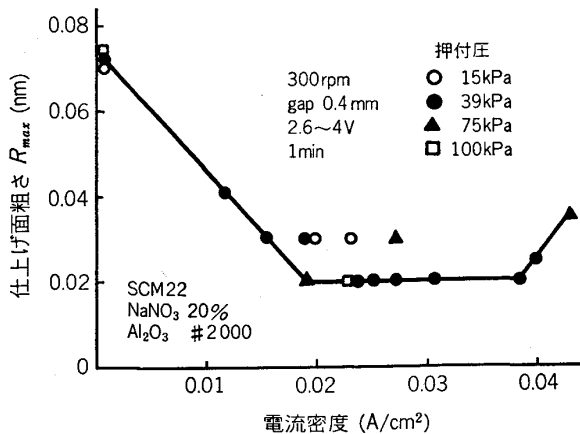


図 4 仕上げ面粗さと電流密度の関係

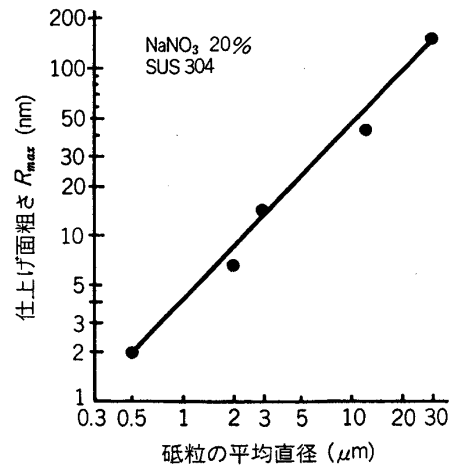


図 5 砥粒径の影響

の電解砥粒研磨の場合、固定砥粒方式による $0.4 \mu\text{m}$ R_{max} 程度の仕上げ面で同じ粗さの #400 バフ研磨よりも塩化ビニールスケールの付着量がかなり少なくなり、さらに遊離砥粒方式による鏡面仕上げでは付着量が 1/20 に減少する³⁾。

電解溶出と砥粒加工が適正なバランスを保った電解砥粒研磨では電解溶出量の方が砥粒加工量を上回り、仕上げ面の性質には電解の影響が多く出る。したがって、砥粒の残留やクラックの発生は砥粒加工単独の場合よりずっと少なくなり、仕上げ面の残留応力が圧縮応力になることもある。加工変質層はあつてもごくわずかと考えられ、数 Å 以上の厚さの酸化不働態皮膜の存在が推測されるが、この皮膜の働きで仕上げ面の耐食性が向上するメリットがある。電解主導型の仕上げ面でありながら、電解につきものの粒界腐食やピットの少ない高性能の鏡面がえられるのは、砥粒により不働態皮膜を除去された地点の方が粒界やはかの欠陥より電解溶出の優先順位が高くなっているためと考えられる。

5. 適用例

5.1 平面の場合

平面を専用に研磨する場合には、図 6 の形の回転円板形電極工具を使用する。中心に設けた吐出口から電解液を数百 kPa の圧力で噴出することにより大きな電解液流量がえられ、これに伴い大電流密度での加工が可能になる。きず取りを含め、数十 μm R_{max} 程度の下地面からの固定砥粒方式による粗研磨に適しており、送りにはフライス盤が利用される。加工電源には少なくとも 100 A クラスの大容量のものを備える必要がある。

回転電極工具の中心からの距離に応じて加工量が増大するので、定速送りを与えた際にえられる加工面の断面形状は図 7 に示すように、中心の盛り上がりつた鉢状になる (送りは紙面に垂直方向)。この盛り上がりは電極径とともに増大し、平坦度を悪くするが、絶対値が小さい量なので、形状精度への影響を $1 \mu\text{m}$ 以下に押える

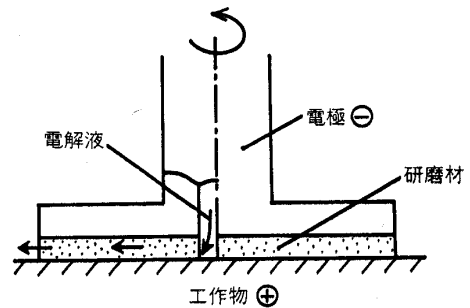


図 6 平面の場合

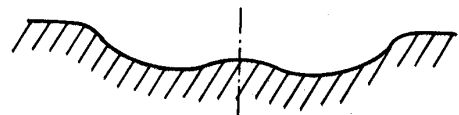


図 7 加工断面形状

のは容易である。電極面を覆っている研磨材の粘弾性特性のため、工具と工作物の間に多少の変位が生じて加工量にはほとんど影響せず、低精度の加工装置でも高精度の仕上げ面をえられる特徴があるが、この場合はある程度以上の長周期のうねり成分が前加工段階で除去されている必要があり、一般には下地面の長いうねり成分はそのまま残るので前加工面より形状精度が向上することはない。研磨で除去されるうねりの上限は mm オーダーなので、前加工で所要の形状精度を出し、仕上げ面粗さだけを改善する目的で使用するのが安全である。

実施例としては、アモルファス太陽電池用ステンレス鋼基板の鏡面仕上げに適用し良好な電池特性をえたとの報告があるが²⁾、コスト的な面で従来方式にとつて代わるところまで達していないとみられる。その他、完全鏡面仕上げするステンレス鋼板として、建築用外装板があるが、この場合もコスト的な問題があり、生産ラインで使用されるまでにはかなりの工夫が必要であろう。完全鏡面仕上げの場合、トータルコストでは $0.2 \mu\text{m}$ R_{max} 程度の粗さの BA 仕上げ 304 材を用い、#800~1500

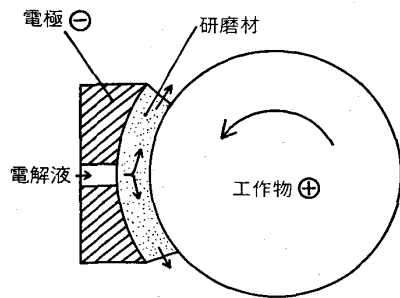


図8 円筒面の場合

の砥石で $0.1 \sim 0.05 \mu\text{m } R_{max}$ の下地研磨してから電解砥粒研磨で砥粒線を消して $0.02 \mu\text{m } R_{max}$ 程度の完全鏡面に仕上げるプロセスが最も安上がりになると考えられる。その際、図6の型式より後に述べる汎用型の電極工具（自由曲面用）の方が量産には適しており、この電極工具を多数個取り付け付けた電解砥粒研磨システムが将来開発、実用化されるものと期待される。

5.2 円筒面の場合

図8は円筒外面の場合の概念図を示す。加工装置には旋盤が利用され、工具電極を絶縁板を介して刃物台に固定するか、刃物台を取り外して工具電極と取付台を新たに設置する。送りはモータ駆動で適正な定速送りを設定するが、この適正送りは下地面の粗さ、工具電極の寸法、工作物回転数に依存し、工作物径が大きいくほど生産性が高くなり、下地面としては $10 \sim 20 \mu\text{m } R_{max}$ の中仕上げ切削面が最も経済的である。円筒外面の場合には表面処理的な観点からの使用ではなく、省熟練自動化の手段として取り上げられることが多いが⁴⁾、将来小径工作物の超精密仕上げに適用されるようになれば新たな局面が展開されることになろう。円筒面ではステンレス鋼材のほか、SC-, SS-, SCM- などの炭素鋼、低合金鋼材も試験され、鋳鉄材以外では良好な仕上げ面がえられている。適用例としては、大径の船用ディーゼル部品の鏡面仕上げが一般的である。

円筒内面への適用の場合は、工具電極を円筒内面で支持し、これに適当な押付圧を付加するうえで工夫が必要となり、内径が小さくなるほど困難さが増大する。大径の場合には自由曲面用の電極工具が利用できるが、小径パイプに対してはまだ適当な方式が見当たらない。

5.3 自由曲面の場合

図9は自由曲面の場合の概念図を示す。回転円板形工具を使用するのは図6の平面の場合と同様であるが、外周の一部分のみを工作物に接触させることにより自由曲面へ適用できる形になっており、中心部で研磨材を工具電極へねじ止めする方式や電極板にあけた多数の小穴を通して研磨材へ電解液を外から供給する方式などに工夫がこらされている。図10は1985年秋から市販されている電解砥粒研磨機の概略を示す。研磨材を含めた総重量は1kg弱で片手で楽に手送り操作が可能である。

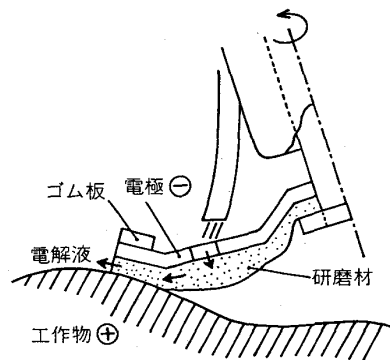


図9 自由曲面の場合

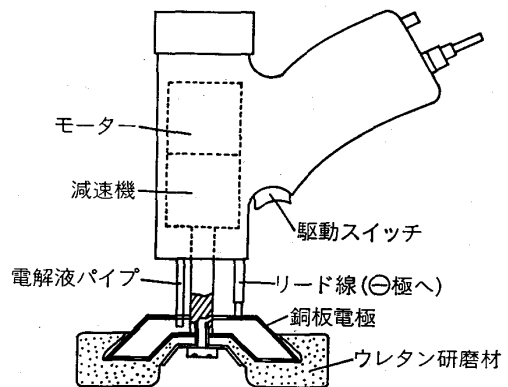


図10 電解砥粒研磨機

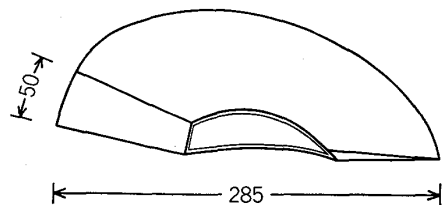


図11 SUS 304 翼形工作物

鏡面仕上げ用なので、 $1 \sim 2 \mu\text{m } R_{max}$ 程度の下地面からの適用が効果的であり、加工電源の容量は30Aが標準である。#150で粗研磨の後、#1000か#1500で中仕上げし、#2000~3000の遊離砥粒で鏡面仕上げする工程が一般的になる。この研磨機は平面や円筒外面を手送りで鏡面仕上げする際にも利用でき、小さな波状の凹凸を有する溶接ビード部の鏡面研磨も可能にするなど広汎な適用性をもつが、標準品として用意された電極工具の外径が100mm強であるため、曲率半径の小さい工作物への適用はまだ不便である。

図11は手送り鏡面仕上げ実験に使用した翼形工作物を示す。きず取りの後、#150、#1000固定砥粒方式で下地研磨し、最後に#2000A砥粒で鏡面仕上げしたが、最も良い部分では $0.02 \mu\text{m } R_{max}$ の仕上げ面粗さがえられた。なお溶接の熱影響で金属組織が粗大化している部分では通常より電流密度を低くしないと粗さが悪化するので注意が必要である。

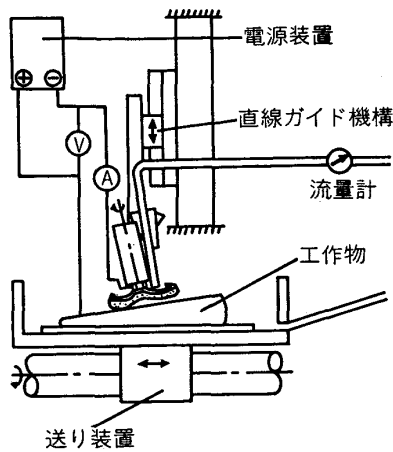


図12 電解砥粒自動研磨装置

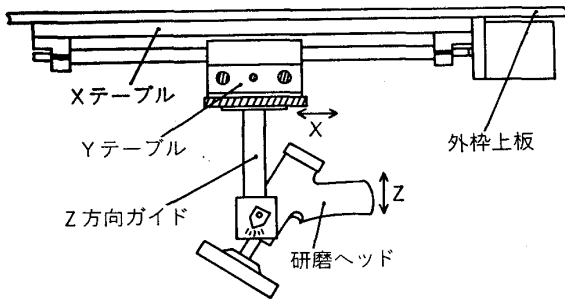


図13 三次元曲面自動研磨装置の主要部

図12はこの電解砥粒研磨機を組み込んだ自動研磨装置の概要を示す。工作物は水平方向へ定速で送られるが、高さの変化に応じて研磨機を取り付けた保持部が垂直方向に設けたリニアスライド上で摺動するので、自由曲面でも適用可能になる。また、図13のように研磨ヘッドの方を二次元的にプログラム制御で移動させる方式の自動研磨装置も開発されて実験的に使用されている。

6. おわりに

電解砥粒研磨は誕生後数年を経たばかりの新しい加工法であるが、円筒面への適用ではすでに生産現場での大幅な能率向上をもたらしており、平面や自由曲面についても汎用の小型電動式電解砥粒研磨機の市販開始に伴い簡便な表面処理方法としてしだいに普及して行くことが期待されている。また、今後の加工精度の制御に関する研究開発の進展により精密金型などの高精度部品への適用の道が開かれ、さらに数 nm 精度の超精密加工法の開発へつながる可能性も秘められており、これから数年間の動向は大いに注目されるところである。

文 献

- 1) 清宮絃一：日工マテリアル，2-11 (1984)，p. 37
- 2) 田宮勝恒：精密機械，50-3 (1984)，p. 44
- 3) 木本康雄，田宮勝恒，本田昭一，安藤利明，
洲崎友彦：電気加工学会誌，12-23 (1978)，p. 1
- 4) 前畑英彦：省力と自動化，12-3 (1981)，p. 59