金属製品の長寿命化を目的とした切削加工法-DEM 法-の実用化研究（第１報）

材料環境部
永石尚昭　帆秋圭司　田栗有樹
株式会社香田製作所
香田和則

本研究では，切削時に加工部に生じる表面変質層を利用し，ステンレス鋼を高強度化する加工技術(DEM 法)の確立を目指している．DEM 法がオーステナイト系ステンレス鋼の耐食性に及ぼす影響を明らかにするために，DEM 法によって加工された SUS316L のアノード分極特性を電気化学測定により取得し，通常加工品と比較した．その結果，両者のアノード分極特性に差が認められなかったことから，DEM 法は SUS316L が本来有する耐食性に影響を及ぼさないことが示唆された．すなわち，DEM 法はステンレス鋼の耐食性を損なうことなく加工部の耐久性の向上を実現する切削加工技術であることを示した．

1. はじめに

金属や樹脂に代表される機械材料を目的の形状に加工するために，製造現場では様々な機械加工法が用いられている．中でも旋削，転削，穴あけ加工に代表される切削加工は，塑性加工，鋳造，鍛造といった他の加工法と比較してミクロンオーダーの高精度な仕上げが可能である．この高い寸法精度と表面品質により，3D プリンタに代表される積層造形技術技術が普及しつつある現在においても，自動車，航空，医療，電子機器などの幅広い産業分野で不可欠な基盤加工技術と言える．

切削加工では加工表面近傍に塑性変形や加工硬化を伴う変質層が形成される [1]．この変質層は，もとの材料よりも高い硬度を示し，強度向上に寄与する可能性があるが，変質層を積極的に利用した加工設計は十分に確立されておらず，実用化のためにはその形成条件と機械的性質，耐食性などの環境強度への影響を体系的に評価する必要がある．

我々は上述の変質層を意図的に形成および残留させることで，加工部を高強度化する切削加工技術「Durability Enhancement Machining (以下, DEM 法)」を提案している．オーステナイト系ステンレス鋼(以下，γ-SUS）を対象とした検証では，加工部をもとの材料の硬さの約 2 倍まで高硬度化できることに加え，さらに圧縮残留応力を付与できることが明らかとなった．さらに，DEM 法によって加工された部分における各種機械的性質を実験的に評価した結果，①疲労強度の向上，特に応力集中部での顕著な改善 [2]，②耐塩化物応力腐食割れ性の向上 [3]，③耐摩耗性の向上 [4,5]，④耐孔食性を損なうことなく高強度化可能 [6]，が確認された．これらの結果は，切削加工における変質層を積極的に利用した新しい高強度化手法としての有効性を示している．実用化が進めば，回転運動や往復運動により繰返し荷重がかかる機械部品，摺動部，さらには引張応力が作用した状態で腐食環境に曝される部材を DEM 法で製造することで，従来はショットピーニングや表面改質処理を必要としていた長寿命化を，追加処理なしに低コストで達成できる可能性がある．

本報では，DEM 法加工面の 5%硫酸水溶液中におけるアノード分極特性を電気化学測定により取得し，DEM 法がγ- SUS の酸性溶液中における耐食性に及ぼす影響を実験的に評価した結果を報告する．

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は固溶化熱処理を施したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L 丸棒ϕ 20mm を用いた．化学成分(mass%)は 0.024C-0.53Si-1.32Mn-0.036P-0.017S-12.05Ni-17.25Cr-0.16Co であり，代表的な機械的性質は耐力$\sigma_{0.2}$＝270MPa，引張強さσ_B＝574MPa，ビッカース硬さ 179HV0.01, 平均結晶粒径は 24μm である．

2.2 試験片形状

図 1 に試験片形状および寸法を示す．評価面の仕上げ状態が異なる 3 種の試験片(a)TP-1(DEM 法適用試験片，研磨なし)，(b)TP-2 (DEM 法適用試験片，研磨あり)，(c)TP-3(通常加工試験片)を調製した．図 2 にそれぞれの調製手順を示す．TP-1 は丸棒端面を

DEM 法で加工し, 切り落として試験片としたものである. TP-2 は TP-1 と同じく DEM 法で加工したものだが，旋削加工の際に残る周方向加工痕を除去する目的のためにわずかにダイヤモンドスラリでバフ研磨したものである．これまでの研究でこの程度の研磨では DEM 法によって生じた表面変質層は除去されないことが分かっている．

TP-3 はディスク状薄型砥石で湿式切断したのち，ダイヤモンドスラリでバフ研磨したものである．供試材が本来持っている分極特性を示すと考えられ，TP-3 の分極曲線と TP-1，TP-2 の分極曲線を比較することで，γ-SUS の耐食性におよぼす DEM 法の影響を明らかにできると考えた．それぞれの試験片の粗さをレーザー顕微鏡(オリンパス株式会社製 OLS-4100)で測定した結果，TP-1：R_a = 0.21μm，R_z = 2.03μm，TP-2：R_a = 0.02μm，R_z = 0.11μm，TP-3：R_a = 0.01μm，R_z = 0.06μm であった．

図 1 に示した各試験片の断面に対して硬さ試験および組織観察を行うために，試験片中心軸を通る面を回転砥石で湿式切断後，導電性を有する熱硬化性樹脂に埋包し，エメリー紙，ダイヤモンドスラリ，コロイダルシリカ懸濁液を用いて鏡面に研磨した．

金属組織観察および試験面の観察には走査電子顕微鏡(株式会社日立ハイテク製 SU5000)を用いた．加速電圧は 15kV とし，反射電子検出器を用いた．また，エネルギー分散型蛍光エックス線検出器(AMETEK 株式会社製 Octane Elect Super)を用いて試験面にみられた介在物の元素分析を行った．

硬さ試験にはマイクロビッカース硬さ試験機（株式会社フューチュアテック製 FM-ARS9000）を用いた．負荷試験力は 5gf，保持時間は 10 秒とした．加工面から深さ 10μm の位置を開始点とし，材料内部に向かって複数列の硬さを測定し，深さ方向硬さ分布を取得した．

2.3 アノード分極測定法

アノード分極測定は，日本産業規格「ステンレス鋼のアノード分極曲線測定方法 JIS G0579 (2012)」に規定されている試験 A 方法[7]を参考にして実施した．

測定は，電気化学測定システム（明電北斗株式会社製　HZ-7000）と専用ガラス電解槽（明電北斗株式会社製　HX-102）を用いて行った．ガラス電解槽を温浴し，測定中の溶液温度を 30℃に保った．対極は白金電極，参照電極は銀-塩化銀電極をそれぞれ用い，参照電極と電解槽は，寒天を封入したルギン管を通じて塩橋を行った（図 3）．

自作した樹脂製ホルダの導電部と試験片裏面を導電ペースト(藤倉化成株式会社製)で接着し導通を確保した．試験面の最終露出部分が 100mm^2 となるように残りの部分をシリコン樹脂で被覆した．シリコン樹脂硬化後，600 番研磨紙で最終露出部分を湿式研磨し，蒸留水およびエタノールで入念に洗浄して室温にて乾燥させた．上述の処理後，12 時間以上経過したものを用いることに統一した．本測定前に，高純度アルゴンガス脱気された 30℃，5% H_2SO_4 水溶液に 10 分間浸漬後，試験片の電位を−0.65V(AgCl)に設定し，10 分間のカソード処理を行った．本測定における電位走引速度は 20mV/min で，自然電位から 1.15V(AgCl)に達するまで電位を走査させた．

上述の方法を用いた場合に取得されるステンレス鋼のアノード分極曲線の例を図 4 に示す．本研究では分極曲線から得られる以下の 5 つの特性値を評価指標とした．

(i) E_{corr}：自然電位 (V)
(ii) E_p：不働態化電位 (V)
(iii) i_{crit}：不働態化電流密度 (μA/cm^2)
(iv) $i_{0.4}$：+0.4V における電流密度 (μA/cm^2)
(不働態化維持電流密度)
(v) $i_{1.0}$：+1.0V における電流密度 (μA/cm^2)

一般的に，高い耐食性を有する材料ほど(i) E_{corr} および(ii) E_p は高く，(iii) i_{crit}, (iv) $i_{0.4}$, (v) $i_{1.0}$ は低い傾向にある．TP-1, TP-2, TP-3 の三種類の試験片のアノード分極曲線から得られる(i)～(v)の値を比較することで，耐食性の優劣を決定した．

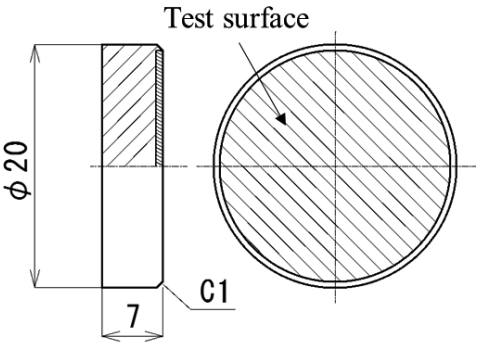


図 1　試験片の形状および寸法

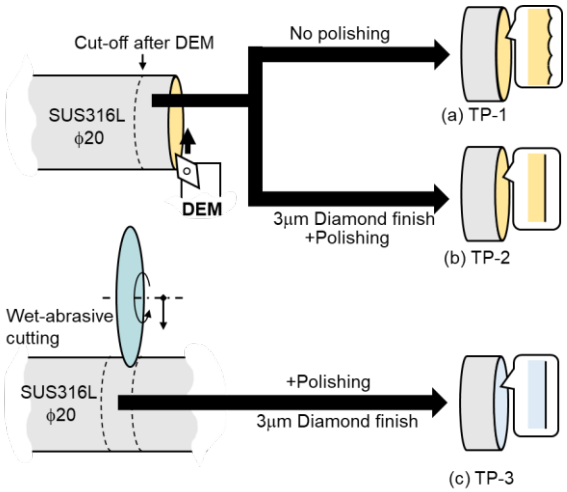


図 2　試験片調製手順

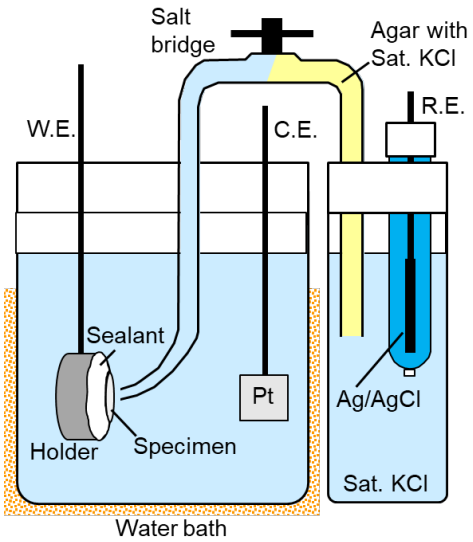


図 3　電気化学測定装置の概略図

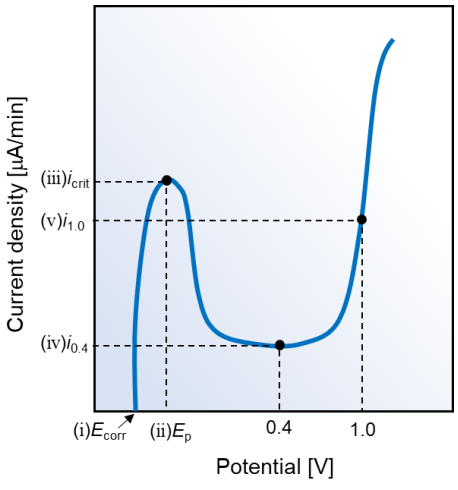


図 4　アノード分極曲線の例

3. 結果および考察

3.1 試験片の硬さと断面組織

図 5(a)に TP-1 および TP-3 の断面硬さ分布を示す．縦軸にビッカース硬さ，横軸に加工面からの深さをとって整理した．TP-2 は TP-1 の加工面をわずかに研磨したのみであり，硬さ分布は TP-1 と同一であったため図示を省略した．

硬さ分布に着目すると，TP-1 では加工面近傍において顕著な硬さ上昇が認められ，深さ方向に進むにつれて初期硬さへと漸近した．硬さの変化は加工面から約 200 μm の範囲に限定され，最高硬さは 335 HV であった．一方，TP-3 では加工面と内部で硬さが一定であり，切断・研磨による加工影響が生じていない供試材本来の状態を示している．

図 5(b), (c)に断面ミクロ組織を示す．TP-3（図 5(c)）では加工面と内部組織に差異は認められず，硬さ分布の結果と整合する．これに対し TP-1（図 5(b)）では，加工面直下において結晶粒界が不明瞭となり，結晶粒が著しく変形・微細化している領域が確認された．さらに，結晶粒内には複数方向のすべり線が観察され，複数のすべり系が活動したことを示唆している．これらの観察結果を総合すると，TP-1 における硬さ上昇は，加工面直下で生じた強い塑性変形およびそれに伴う結晶粒微細化に起因すると考えられる．

3.2 アノード分極曲線

図 6(a)に TP-1, TP-2 および TP-3 のアノード分極曲線を示す．各試験片の分極曲線を活性領域，不働態化領域，および過不働態化領域に区分して整理し

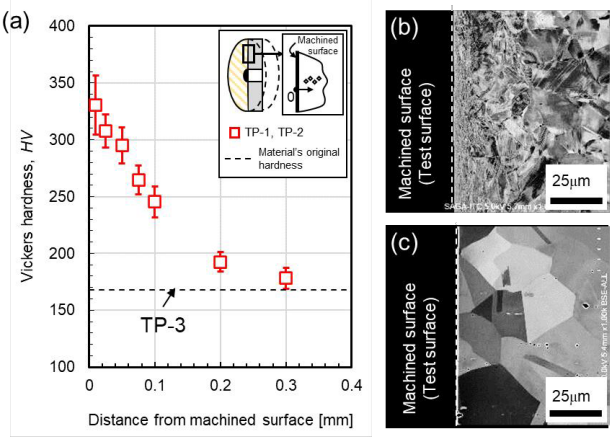


図 5　試験片の硬さ分布，断面組織
(a)硬さ分布，(b)断面組織：TP-1，
(c)断面組織：TP-3

た．活性領域は自然電位から不働態化電位（第 1 ピーク）まで，不働態化領域は電流密度が急減した後に一定値を示す領域と定義した．

これらの領域に基づいて挙動を比較した結果，電流密度の変化傾向や不働態化の開始電位に顕著な差はみられなかった．なお，第 1 ピーク前後で TP-1 の電流密度がわずかに高くなったのは，試験片表面粗さが大きいことが影響したと考えられる．

さらに，各分極曲線から得られた特性値 (i)～(v) を比較した結果を図 6(b) ,(c)に示す. いずれの試験片も同等の特性値を示しており，有意な差は確認されなかった．

Menezses らは，ショットピーニング処理によって表面にナノ結晶層を形成し，高硬度化した SUS316L の 0.5M-H_2SO_4 水溶液中におけるアノード分極挙動を調査した結果，処理材の腐食電位は未処理材と同等であったものの，不働態化領域においてショットピーニング処理材の方が低い不働態化電流密度を示すことを報告している [8]．この結果は，ショットピーニング処理によって結晶粒界密度が向上することで，密着性が高く安定した不働態被膜が形成され，耐食性が向上したことを示唆している．また，Yazdani らも同様に, ショットピーニングによる耐食性の向上を示唆する結果を報告している [9]．

図 5 に示すとおり, DEM 法で加工された TP-1 および TP-2 の表面組織は, TP-3 と比較して明らかに結晶粒が微細化しており，それに伴う高硬度化が確認された．この表面状態は，ショットピーニング処理材ほど強い処理ではないものの，類似した特徴を有するので，TP-1，TP-2 は TP-3 に比べ高い耐食性を有することが期待されたが，アノード分極挙動には有意な差は認められず，同等の耐食性であるという結果となった．

この結果は，DEM 法がγ- SUS 本来の耐食性を損なうことなく高強度化を実現できる技術であることを示しており，実用上きわめて有望である．

一方，耐食性の維持にとどまらず耐食性の向上という新たな機能を付与できる技術へと発展するには，本実験で耐食性の向上には至らなかった要因を深掘りし，対応策を検討する必要がある．

Tsutsumi らは，LPBF(Laser Powder Bed Fusion，3D プリンティング技術の一種)で造形した SUS316L の耐食性を電気化学的に評価し，板材や丸棒などの一般的な溶製材と比較して，LPBF 材が非常に優れた耐食性を示すことを報告している [10]．その理由として，局部腐食挙動は介在物（MnS）の存在形態に

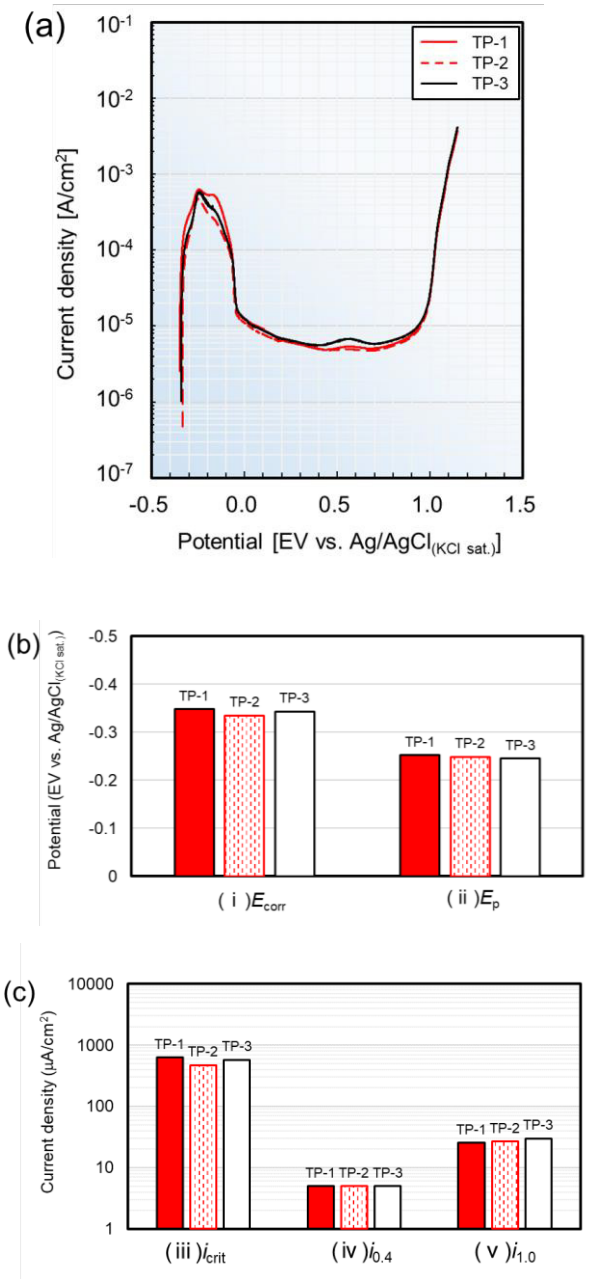


図 6　アノード分極曲線測定結果
(a)アノード分極曲線，(b)特性値(電位)，
(c)特性値（電流密度）

強く支配されることを指摘しており，LPBF 材では造形時の急熱／急冷により介在物の大きさが 100 nm 以下に抑えられるため，腐食起点になりにくく，結果的に耐食性に優れると説明している．また，結晶方位や粒界密度は耐食性に大きな影響を及ぼさないことも示している．

本研究では，各試験片における介在物の分布および形態を詳細に観察した． 図 7 に，各試験片の試験前表面を電子顕微鏡で観察した結果を示す. TP-2 で

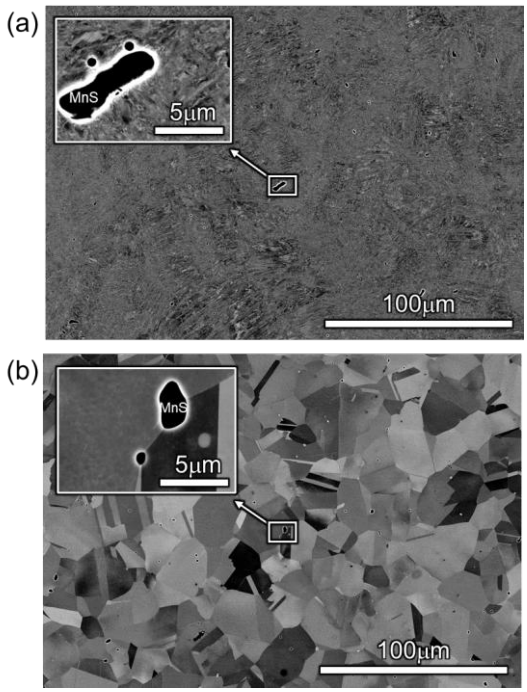


図 7　試験面観察結果(試験前の状態)
(a)TP-2，(b)TP-3

は表面組織が微細化していたものの，介在物の種類や分布状態は TP-3 と同等であった. このことから，DEM 法による加工では結晶粒の微細化や高硬度化は生じるものの，介在物の存在形態は変化せず，その結果として耐食性に差が現れなかったと考えられる.

前述のショットピーニング処理材に関する報告[8,9]では，介在物の存在状態までは評価されていないものの，ショットピーニングは DEM 法よりも強い加工であるため，介在物が微細化・破砕された可能性がある． この点を踏まえると，ショットピーニング材で耐食性が向上した背景には，介在物の存在形態の変化が寄与したことが想定される.

以上のことから, DEM 法の加工条件を見直すことで材料中に元来存在する介在物を微細化できれば，高強度化と耐食性の向上を両立できる可能性があるため，今後検討を進めて行きたい.

4. おわりに

DEM 法加工面の 5%硫酸水溶液中におけるアノード分極特性を電気化学測定により取得し, DEM 法がγ- SUS の酸性溶液中における耐食性に及ぼす影響を実験的に評価した. その結果，DEM 法加工された試験片は，通常加工された試験片と同等の分極挙動を示し，DEM 法がγ- SUS 本来の耐食性を損なうことなく高強度化を実現できる技術であることを示しており，実用上きわめて有望であると言える. DEM 法の加工条件を見直すことで材料中に元来存在する介在物を微細化できれば，高強度化と耐食性向上を両立できる可能性があるため，今後検討を進めて行きたい.

最後に，本研究で使用したレーザー顕微鏡，マイクロビッカース硬さ試験機，自動研磨機，走査電子顕微鏡は電源立地地域対策交付金により導入した機器である.

参考文献

1) R. Hikiji, E. Kondo, N. Kawagoshi, M. Arai, Transactions of the JSME Series C 66 (2000) 2423–2428.
2) N. Nagaishi, K. Hoaki, Y. Taguri, T. Hirai, 佐賀県工業技術センター　研究報告書 (2022) 11–16.
3) N. Nagaishi, K. Hoaki, T. Hirai, K. Koda, 佐賀県工業技術センター　研究報告書 (2023) 25–29.
4) N. Nagaishi, K. Hoaki, K. Koda, Transactions of the JSME (in Japanese) 92 (2026) 25–00163.
5) N. Nagaishi, K. Hoaki, K. Koda, 佐賀県工業技術センター　研究報告書 (2024) 7–11.
6) N. Nagaishi, K. Hoaki, Y. Taguri, K. Kouda, 佐賀県工業技術センター　研究報告書 (2025) 31–36.
7) 日本産業規格調査会, ステンレス鋼のアノード分極曲線測定方法　JISG0579(2012), 2012.
8) M.R. Menezes, C. Godoy, V.T.L. Buono, M.M.M. Schvartzman, J.C. Avelar-Batista Wilson, Surf. Coat. Technol. 309 (2017) 651–662.
9) F. Yazdani, S.M. Rabiee, R. Jamaati, Heliyon 10 (2024).
10) Y. Tsutsumi, T. Ishimoto, T. Oishi, T. Manaka, P. Chen, M. Ashida, K. Doi, H. Katayama, T. Hanawa, T. Nakano, Addit. Manuf. 45 (2021).