アルミニウム研削面からのエキソエレクトロン放射*

正野崎 友信** 大 島 郁 也*** 百 瀬 義 広†

Exoelectron Emission from Ground Aluminium Surface

Tomonobu SHONOUZAKI, IKUYA OHSHIMA, Yoshihiro MOMOSE

The glow-curve characteristics (25–239°C) of photostimulated exoelectron emission for aluminium surface ground using a surface grinding machine have been examined. The intensity of emission for the surface ground with WA (Al_2O_3) grinding wheels (grain size, 60 and 120) was much larger than that for GC (SiC) wheels (grain size, 60 and 120), and the former exhibited two peaks of the emission intensity at about 100 and 200°C and the latter only one peak at about 100°C. The surface for WA wheel of smaller grain size emitted more electrons, but in the case of GC wheels the difference in grain size had little effect. The number of electrons emitted for upward grinding was larger than that for downward grinding with the exception of the case of WA 120 grinding wheel. When the photostimulation was stopped during measuring the emission, the emission intensity in a lower temperature region remarkably decreased particularly in the case of the surface ground with GC grinding wheels. With the aid of exoelectron emission, the electronic property of ground metal surface may be revealed.

1. 緒 言

固体が機械加工や X 線照射などを受けたとき、しばらくの間、固体表面から低エネルギーの電子放射が観測される。この現象については 1949 年に Kramer¹⁾ が報告して以来数多くの研究がなされ、これはエキソエレクトロン放射と呼ばれている (グラマー効果ともいわれるが、ここでは電子放射と呼ぶ)。この電子放射機構はまだよく解明されていないが、機械加工された金属からの電子放射には主に次のような三つの異なる効果が重要であるといわれている^{2)~4)}。① 新生金属表面が形成され、それに酸素や水分子の吸着が起こること、② 金属中の格子欠陥の形成、そして ③ 表面酸化物中の格子欠陥の形成である。これらの説はまだ、一般に受け入れられていない。しかし、この電子放射は表面の構造敏感性に起因することが明らかにされており、この電子あるいは電子放射現象を利用しようとする研究が行われている。

加工変質層および表面を調べる方法として種々のものがあるが、電子放射測定も判定手段として応用されつつあり、すべり面についての報告⁵⁾ などがある。実験室的方法で研摩や単純な機械的変形を行った金属表面からの電子放射に関する研究報告は数多くある³⁾。例えば、研摩布紙による加工アルミニウム面⁶⁾、サンドブラスト軟

鋼面⁷⁾ さらに砥石の破砕砥粒からの電子放射⁸⁾ についての報告がある。しかし、実際の工作機械を用いて研削または切削加工した表面からの電子放射についての報告はほとんど見当たらない。それゆえ、加工方法および加工条件と電子放射の関連について知見を得るために、工作機械による加工面からの電子放射を測定することは重要であると考えられる。本報では、平面研削されたアルミニウム表面からの電子放射と砥石の種類、粒度および研削方式との関係、そして電子放射に対する白色光照射 (以後これを光刺激と呼ぶ) の有無の影響について報告する。

2. 実 験

2.1 試料および研削方法

アルミニウム試片として市販品 A 1050 P-H 22 (100×15×0.6 mm) を真空焼なまし (350°C, 30 min 間) したものをを用いた。砥石として GC 60 H 7 V, GC 120 H 7 V, WA 60 I 7 V および WA 120 I 7 V を用いた。研削は横軸平面研削盤により乾式で行った。研削条件として、砥石周速度: 1 780 m/min, 加工物速度: 9 m/min, 最終砥石切込み: 20 μ m および研削方式: up cut と down cut を選び、ドレッシングは 20, 20, 10, 10 μ m の順序の切込みで送り速度は 0.2 (#120) と 0.4 (#60) で行った。研削では、各試片につき砥石のドレッシング後、あらかじめ 10 μ m の切込みで砥石面が試片面に様に接触するようにした後、最初にすべての試片について研削前処理として 20 μ m の切込みで up cut を行い、次に 20 μ m

* 原稿受付 昭和 50 年 3 月 10 日。昭和 49 年度精機学会秋季大会学術講演会 (昭和 49 年 10 月 22 日) にて発表。

** 正 会 員 神奈川大学工学部 (横浜市神奈川区六角橋町)

*** 正 会 員 茨城大学工学部 (日立市中成沢町 4-12-1)

† 茨城大学工学部

カウンタガス: エタノール (20 Torr) + アルゴン (84 Torr),
作動アノード電圧: 1320 V, プラトー領域: 1280~1380 V

図1 ガイガーミュラー型カウンタの構造

図2 電子放射測定ブロックダイアグラム

の切込みで up cut または down cut を行い研削方式の異なる試片面 (おのおの up cut 研削面, down cut 研削面と呼ぶ) を作成した。そして研削された試片を 15×15 mm の大きさに切断し、研削終了時から 5 min 20 s 後に電子放射測定装置 (一種のガイガーミュラー型カウンタ; GM 管) の試料台にのせた。

2.2 電子放射測定法

図1 は今回の計測に使用した GM 管の構造を示す。測定は次のように行った。試片を試料台にのせた後、カウンタ内を脱気し、アルゴン洗浄し、次にカウンタガスを封入した。アノードに電圧をかけ、試片には加速電圧をかけ、図2 に示す測定機器および回路により電子放射測定を行った。研削終了後 9 min 後に測定を開始し、初めにレイトメータが定常に作動するまで 25°C で 1 min 間計測し、続いて試片を 25°C から 239°C まで 19°C/min の昇温速度で加熱 (熱刺激と呼ぶ) して、放射強度の温度依存性 (グロー曲線と呼ぶ) と放射された電子の総計数値を計測した。この場合、普通はカウンタ上部より 100

1: up cut 研削面, 2: down cut 研削面

図3 GC 60 H 7 V 砥石によって研削されたアルミニウム表面からの電子放射グロー曲線 (光刺激あり)

V-20 W の白色光 (波長: 300 nm 以上, 試片面明るさ: 5 lux) を照射した。実験はおおのこの条件につき 5 回以上行った。各条件に対する放射特性の比較は総計数値の中央値およびそのグロー曲線を用いて行った。なお、焼なましした未研削アルミニウム板からは今回の測定条件では電子放射は観測されなかった。また、研削試片の X 線回折図や表面あらさも調べた。

本報告に示した放射強度および総計数値は測定値より GM 管のバックグラウンド値を差し引いたもので、また、総計数値には 25°C, 1 min 間の放射電子数を含めていない。

3. 実験結果

3.1 GC 砥石による研削面からの電子放射

図3 は GC 60 H 7 V 砥石によって研削されたアルミニウム表面からの電子放射グロー曲線の代表例を示す。up cut 研削面および down cut 研削面ではともに試片の温度上昇とともに放射強度は次第に増加し、100°C 付近で放射極大に達し、それから減衰した。up cut 研削面は down cut 研削面に比べて大きな放射強度を示した。

図4 は GC 120 H 7 V 砥石による研削面とその砥粒からの電子放射を示す。また、この図には光刺激の有無の影響も示されている。光刺激のある場合には、図3 に示した GC 60 砥石の場合と同様な挙動が観測され、100°C 付近に極大が現れた。up cut 研削面では down cut 研削面に比べて放射強度および総計数値はともに約 2 倍程度大きかった。GC 砥石研削面からの電子放射に対する粒度 (#60 と #120) の効果はほとんど認められなかった (図8 参照)。光刺激のない場合には、放射強度は非常に

1: up cut 研削面 (光刺激あり), 2: down cut 研削面 (光刺激あり), 3: up cut 研削面 (光刺激なし), 4: down cut 研削面 (光刺激なし), 5: GC 120 砥石の砥粒 (0.470 g, 光刺激なし)

図4 GC 120 H 7 V 砥石によって研削されたアルミニウム表面からの電子放射グロー曲線

小さくなり、極大温度は 150°C 付近にずれた。さらに、総計数値も光刺激のある場合の約 1/6 となった。また、up cut 研削面は down cut 研削面に比べて大きい電子放射強度を示した。

図4の5の曲線は、GC 120 砥石より 10 μm の切込みでドレッシングして採取した GC 砥粒のグロー曲線 (光刺激なし) である。放射測定は砥粒を試料皿 (金板, $\phi 20\text{ mm}$) にのせて研削面と同様な方法で行った。GC 120 砥粒は放射強度および総計数値ともに非常に小さな値を示した。GC 120 砥粒からの放射に対する光刺激の影響を調べるために、計測の途中で光照射を数回行ったが、放射強度の変化は認められなかった。

なお、X 線回折により研削面には GC 砥粒 (SiC) がうめ込まれていることが確認された。

3.2 WA 砥石による研削面からの電子放射

図5は WA 60 I 7 V 砥石研削面からの電子放射を示す。up cut 研削面および down cut 研削面はともに 100°C 付近と 200°C 付近に二つの極大を示した。100°C 付近の極大放射強度は down cut 研削面よりも up cut 研削面の場合により大きかったが、200°C 付近の放射強度は両面でほとんど差が認められなかった。

図6は WA 120 I 7 V 砥石研削面およびその砥粒からの電子放射を示す。光刺激の有無にかかわらず、放射強度および総計数値は非常に大きかった。放射極大は WA 60 砥石の場合とほぼ同じ温度に二つ現れた。ただし、図中の2の曲線では 100°C 付近の放射極大が現れていないが、この条件下では、この極大は6回の実験のうち4

1: up cut 研削面, 2: down cut 研削面

図5 WA 60 I 7 V 砥石によって研削されたアルミニウム表面からの電子放射グロー曲線 (光刺激あり)

1: up cut 研削面 (光刺激あり), 2: down cut 研削面 (光刺激あり), 3: up cut 研削面 (光刺激なし), 4: down cut 研削面 (光刺激なし), 5: WA 120 砥石の砥粒 (0.456 g, 光刺激なし)

図6 WA 120 I 7 V 砥石によって研削されたアルミニウム表面からの電子放射グロー曲線

回観測されなかった。また、光刺激のない場合の down cut 研削面でも 100°C 付近の極大は観測されないことがあった。光刺激のない場合には、総計数値は up cut 研削面では半減したが、down cut 研削面ではわずかに減少しなかった。光刺激のある場合に、計測中に光刺激を中断すると、放射強度は低温部 (100°C 付近の放射極大を含む) では明らかに小さくなったが、高温部 (200°C 付近の放射極大を含む) ではほとんど変化は認められなかった。WA 砥石研削面の放射強度および総計数値は GC 研削面のそれらに比べて非常に大きかった。

図6の5の曲線は WA 120 砥石の砥粒からのグロー曲

図7 放射極大温度のばらつき範囲(光刺激あり)

線(GC 120 砥石の砥粒の場合と同様に採取し測定を行った)を示す。WA 120 砥石の砥粒は低温側に小さな放射極大と高温側に大きな放射極大を示し、そして放射強度および総計数値はともに GC 120 砥石の砥粒の値よりずっと大きかった。そして光刺激の影響は認められなかった。

なお X 線回折により WA 砥石研削面には砥粒(α - Al_2O_3)がうめ込まれていることが確認された。

3.3 アルミニウム研削面からの熱刺激電子放射特性値(光刺激あり)

アルミニウム研削面からの電子放射グロー曲線の特性値として得られた極大放射強度、放射極大温度および総計数値について総括的に述べる。

放射極大は、GC 砥石の場合には 100°C 付近に一つ、WA 砥石の場合には 100°C 付近(一部の条件下では観測されない場合もあった)と 200°C 付近に二つ観測された。すべての試片について、極大放射強度のばらつきは 100°C 付近のものではその中央値から平均 $\pm 40\%$ 、 200°C 付近のものではその中央値から平均 $\pm 42\%$ の範囲内にあった。

図7は各条件下における放射極大温度のばらつき範囲とその中央値(○印)を示す。 100°C 付近の極大温度はその中央値から平均 $\pm 13^\circ\text{C}$ 、 200°C 付近のそれはその中央値から平均 $\pm 4^\circ\text{C}$ の範囲内にあった。

図8は各条件下の研削面に対する個々の総計数値(●印)とその中央値(○印)を対数目盛で示す。すべての試片について、総計数値はその中央値から平均 $\pm 42\%$ の範囲内にあった。

4. 考 察

はじめに、電子放射について述べる。焼なましした

図8 放射電子総計数値のばらつき範囲(光刺激あり)

けの試片および破碎砥粒自身からの電子放射は観測されないか、あるいは研削面に比べて非常に小さいことが見いだされた。それゆえ、研削面から大きな放射が観測されたことは、研削によるアルミニウム、砥粒成分およびふん囲気間のメカノケミカルな過程が複雑に重なった結果、加工表面に放射されやすい電子が捕捉されたことを示す。一般に、摩擦接触する固体表面においては、結晶格子のひずみの増大や無定形化、格子原子の放出(tribosublimation)、摩擦電子放出(triboelectron emission)、溶融沸騰状態(magma-plasma model of Thiesen)、摩擦ルミネッセンス(triboluminescence)、摩擦吸収(triboabsorption)、および摩擦化学反応(tribochemical reaction)などが起こることが知られている⁹⁾。機械加工後の固体表面から生ずるエキソエレクトロン放射は、上記のような効果のなごりとしてもたらされたもので、一過性の現象である。

本報告では、実用されている工作機械によって研削された工業表面を取扱っているので、電子放射機構は非常に複雑である。斉藤ら⁶⁾は、炭化けい素研摩布紙による研摩面の 100°C 付近の幅広い放射極大は光刺激に対して非常に敏感であること、そして X 線照射された面では 120°C と 240°C 付近に比較的明りょうな極大が観測されるが、これらは光刺激の影響をほとんど受けないことを報告した。Scharmann と Seibert¹⁰⁾は、光刺激のない場合、切削、 β 線や X 線照射あるいは電子衝撃を受けたアルミニウムでは 120°C 付近と 250°C 付近に放射極大が現れること、そして電子放射には酸化層の存在が必須であって、放射源は表面酸化物内の格子欠陥の近傍にあることを報告した。Arnott と Ramsey¹¹⁾は、アルミニウムを引張変形した場合の電子放射は、薄い酸化

膜 (45 nm 以下) をもつ場合には光刺激下で起こり, これは新生金属表面の露出と吸着に関係すること, そして厚い酸化膜 (45 nm 以上) をもつ場合には光刺激のない場合にも起こり, これは酸化膜中に割れ目が進行することに関係することを報告した. Gieroszyński と Sujak¹²⁾ も, 光刺激のない場合に観測される引張変形中の酸化膜 (50 nm 以上) をもつアルミニウムからの電子放射は酸化膜中に生じた割れ目の高い電場に起因すると考えた.

GC および WA 砥石による両研削面の光刺激電子放射グロー曲線では放射極大が一つあるいは二つ観測された. GC 砥石研削面の 100°C 付近の極大は光刺激の影響下で生ずること, そして WA 砥石研削面の 100°C 付近と 200°C 付近の極大は光刺激のない場合でも顕著に現れることが見いだされた. 上記の報告に基づいて, 本実験の GC および WA 砥石研削面のグロー曲線の型を吟味すると, それらの放射機構は相当異なっているものと考えられる. アルミニウムの清浄表面の光電子放射の仕事関数は約 4.2 eV であって, これは 290 nm の限界波長 (photo-electric threshold) に相当する. 本実験では 300 nm 以上の波長の光を用いているので, 観測された光刺激依存性の電子放射は, 清浄表面よりはむしろもっと浅いエネルギーの捕捉準位 (trap) に起因すると考えられる¹³⁾. 放射源は, GC 研削面では吸着層かあるいは薄い酸化膜, WA 研削面では格子欠陥を多数含む厚い酸化膜に存在すると推定される. これに関連して, 一般に, 酸化アルミニウム砥石によるアルミニウム研削では砥石の目づまりが著しく起こるといわれている⁸⁾. WA 研削面においては, 砥石に凝着したアルミニウムの切りくずが試片に再溶着したために生じた表面層, あるいは研削中のアルミニウム試片と砥粒成分の酸化アルミニウム間の強いメカノケミカルな作用によって生じた表面層が放射源を作ると考えられる. これは, WA 研削面からの電子放射グロー曲線における二つの放射極大が光刺激がなくとも顕著で, また, その放射量が GC 研削面に比べて非常に多いということからも推察される.

電子放射に対する砥石粒度および研削方式の影響について述べる. GC 研削面の放射特性値は砥石粒度の相違によって大きく変化しなかったが, WA 砥石の場合には粒度が細かい (#120) のとき, 放射量はずっと多かった. これは, 研削作用した砥粒数が多かったこと, そして切込みが #60 砥石の場合と同一であったため破碎砥粒が研削面に多くうめ込まれたこと, またさらに, 砥石に凝着した切りくずが加工面へ激しく再溶着したことなどに起因するものと考えられる. 一般に, up cut 方式は down cut 方式に比べて摩擦おしつぶし作用が大きく,

使用砥石 a: GC 60 H 7 V, b: GC 120 H 7 V,
c: WA 60 I 7 V, d: WA 120 I 7 V

図9 アルミニウム研削面 (up cut) の断面曲線

加工表面層の流動が大きいので, 表面近傍の格子ひずみや格子欠陥の密度が高いといわれている. この影響によって, up cut 研削面からの放射強度は down cut 研削面のそれより大きくなると考えられる. Baxter¹⁴⁾ は, 金属からの光刺激電子放射は, 圧縮変形よりも引張変形を行った場合にずっと強く観測されること, そしてこれは新生金属表面の露出の効果が二つの変形の仕方異なることに関係することを報告した. したがって, GC 研削面の場合, down cut 研削面の方が放射量が少ないことは電子放射源をもつ表面の露出程度が小さいことに関係することも考えられる. ただし, WA 120 砥石の場合には, 図6から明らかなように down cut 研削面の放射強度は up cut 研削面のそれよりずっと大きく, 他の場合と逆の傾向を示した. これは微小破碎砥粒のうめ込みや砥石の目づまりの影響を強く受けたための特殊例と考えられる.

加工面の電子放射測定方法に関して述べる. 研削加工層および表面の状態の判定手段として, エクソエレクトロン放射測定法は現在まだ一般には利用されていない. 電子放射特性値 (放射強度および総計数値) はその中央値から平均 $\pm 42\%$ 以内のばらつきを示しているが, ばらつきの範囲を考慮しても特性値は研削条件 (砥石の種類, 粒度および研削方式) に大きく依存していることが明らかである (図8). 図9はGCおよびWA砥石による up cut 研削面の断面 (表面あらさ) 曲線を示す. #60

の場合に比べて、# 120 の場合のあらさはやや小さいが、そのほかの相違を見いだすことは難しい。ここに、種々の加工面測定法に加えて、加工方法と加工表面層の関連を電子的な観点から検討するための測定手段として、電子放射測定法は一般に利用できるものと考えられる。

5. 結 論

アルミニウム研削面からの熱刺激電子放射（光刺激あり）の挙動（グロー曲線）については次のように結論される。

- (1) WA 砥石（粒度 60 および 120）による研削面からの電子放射量は、GC 砥石（粒度 60 および 120）による場合に比べて非常に多く、放射グロー曲線において放射極大が前者では 100°C 付近と 200°C 付近に、後者では 100°C 付近に観測された。
- (2) 砥石粒度の影響については、GC 砥石の場合では放射特性値に大きな差異は認められなかったが、WA 砥石の場合では細かい粒度（# 120）のものがずっと多い放射量を与えた。
- (3) 研削方式の影響については、WA 120 砥石の場合を除いて、up cut 研削面からの放射量は down cut 研削面に比べて多かった。
- (4) 放射測定中に研削面（特に GC 砥石による研削面）への光刺激を中断すると、低温側（100°C 付近の放射極大を含む）の放射強度は著しく減少した。
- (5) 電子（エキソエレクトロン）放射測定によりアルミニウム研削面の状態を電子的観点から判定できる。

終わりに、本研究にあたりお力添えをいただいた茨城大学工学部・鈴木正光助教授、本橋嘉信氏ならびに測定に協力していただいた当時の同大学学生の斉藤秀美、石井栄、大森広通、宮川信三、山田達男の諸君に深く感謝いたします。また、終始ご指導、ご鞭撻をいただいた東北大学・玉井康勝教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) J. Kramer: Spitzenzähler und Zählrohr bei metallographischen Oberflächenuntersuchungen, *Z. Phys.*, **125**, (1949) 739.
- 2) L. Grunberg: A Survey of Exoelectron Emission Phenomena, *Brit. J. Appl. Phys.*, **9**, (1958) 85.
- 3) F. R. Brotzen: Emission of Exoelectrons from Metallic Materials, *Phys. Stat. Sol.*, **22**, (1967) 9.
- 4) A. Scharmann: Exoelectron Emission, Phenomena and Parameters, 4th Int. Symp. Exoelectron Emiss. Dosim., Ed. A. Bohun, Czech. Acad. Sci., Inst. Solid State Phys., Prague, (1973) 12.
- 5) V. D. Evdokimov & P. A. Rebinder: Manifestation of the Adsorption-induced Loss of Strength Associated with Reversing Sliding Friction, *Soviet Physics-Doklady, Tech. Phys.*, **14**, 4, (1969) 386.
- 6) 斉藤安俊, 品川 豊, 長谷川吉樹: アルミニウム表面からのエキソ電子放射, *金属学会誌*, **38**, 11 (1974) 1006.
- 7) Y. Tamai & Y. Momose: Glow-curve Characteristics of Exoelectron from Sandblasted Metal, *J. Appl. Phys.*, **39**, 11, (1968) 5329.
- 8) 正野崎友信, 石渡秋二: 砥粒の破砕と電子放射, *精密機械*, **39**, 11 (1973) 1146.
- 9) G. Heinicke: Reibung, Schmierung und Verschleiß als grenzflächenmechanische Prozesse, *Schmier-technik*, **13**, 2, (1966) 81.
- 10) A. Scharmann & G. Seibert: Elektronennach-emission und Photoemission von Aluminium-oberflächen, *Z. Phys.*, **183**, (1965) 249.
- 11) D. R. Arnott & J. A. Ramsey: Electron Emission from Anodically Oxidized Aluminium due to Tensile Deformation, *Surface Sci.*, **28**, (1971) 1.
- 12) A. Gieroszyński & B. Sujak: Exoelectron Emission in Vacuum in the Absence of Light during Plastic Deformation of Aluminium Thickly Coated with Oxide, *Acta Phys. Polon.*, **28**, (1965) 311.
- 13) J. A. Ramsey & G. F. J. Garlick: Sensitized Photoelectric Emission during Oxidation of Aluminium, *Brit. J. Appl. Phys.*, **15**, (1964) 1353.
- 14) W. J. Baxter: Photostimulated Exoelectron Emission and Slip-step Geometry during Tensile and Compressive Deformation, *J. Appl. Phys.*, **45**, 11, (1974) 4692.