

ガス溶断における火花粒子(スパッタ)の飛散†

八島 正明*1

本研究では、アセチレン-酸素のガス溶断で鋼材を切断する際に発生するスパッタについて、発生状況、移動速度、温度、床に落ちて冷えた後の粒子径と密度などを調べた。実験では、一般構造用圧延鋼材 SS400 で板厚の異なる 4 種類 (6, 10, 16, 22 mm) の板を用いた。実験では、再現性の良い切断状況を実現できるように、固定した吹管に対して、切断する板を所定の速度で自動的に移動させて切断できる装置を製作した。主な実験結果は次のとおりである。a) 切断高さが 1.5 m の場合、赤熱したスパッタの見かけの到達距離は 3.1 m であるが、スパッタは 5 m を超えて飛散することが考えられること。b) スパッタの移動速度は切断面から離れるに従い大きくなり、10~50 m/s であること。c) スパッタの初期温度は 2,200 から 2,300°C であること。d) スパッタの平均粒子径は 1 mm 以下のものが多いが、板厚とともに大きいものを含むこと。

キーワード: ガス爆発, ガス溶断, 火花粒子, 解体作業

1 はじめに

近年、化学設備や機械設備の老朽化による更新や廃棄は増加傾向にあり、タンクやサイロなどの貯槽の解体作業における爆発災害が頻発している。金属製の貯槽の解体作業ではガス溶断器具を使った作業が多く、爆発の原因となる物質 (例えば、廃液、汚泥、スラッジなど) が残っていたり、解体作業の際の熱の影響でタンク内の残さから連鎖的に爆発性の物質が生じたりする、などの理由で爆発する危険性があることは従来から知られている (図 1)¹⁻³⁾。ガス溶断の際の火花粒子 (スパッタ) は予想よりも遠くまで飛散し、高温であるゆえに、有機溶剤や可燃性液体などを使って作業を行っている離れた場所で引火、爆発したり、あるいは、保管中の可燃物に付着することで一定時間経過してから火災になったりする。このような爆発や火災の危険性^{4,5)}が知られているにもかかわらず、同種災害が繰り返されている。

産業現場ではガス溶断器やアーク溶接機のほか、研磨機やグラインダーカッターなども用いられ、これらも火花粒子が発生する。火花粒子の大きさ、温度、飛散などの性質は器具によって異なる⁶⁻¹⁰⁾。図 2 にアーク溶接作業中のスパッタの飛散による爆発事例を示す。なお、本稿では火花粒子をスパッタで統一する。

ガス溶断のスパッタは、2.2 m (あるいは 2.1 m) の高さで水平に溶断した場合、その到達距離は最大 10 m になるという^{5,7)}。また、桶川らの研究⁶⁾では、20 m の高さの場合、風の影響もあるが、スパッタは地面に落ちてから跳ねて転がり、6~15 m も達するという結果を得ている。Hoelemann と Worpenberg⁷⁾は、溶断場所からの距離と落下するスパッタの割合の関係、飛散距離、距離に対するスパッタの温度などを調べている。

アーク溶接におけるスパッタ飛散の流体力学的特性については詳細に調べられている⁸⁾。アーク溶接による火花の可燃性液体と固体の着火性については萩原ら⁹⁾が調

べており、粒子がかなり小さいながらも赤熱状態にあって温度が高く、可燃物を着火させる能力があることを明らかにした。しかし、遠くまで飛散したスパッタがどの程度の着火性を有するのかは不明な点がある。災害調査における着火源の検討の際には、スパッタの性状と飛散特性の知見は必要である^{10,11)}。

本研究では、ガス溶断の際に発生するスパッタの性状と飛散特性、可燃性ガス・蒸気に対するスパッタの着火性を明らかにすることを最終目的とする。着火性に関し

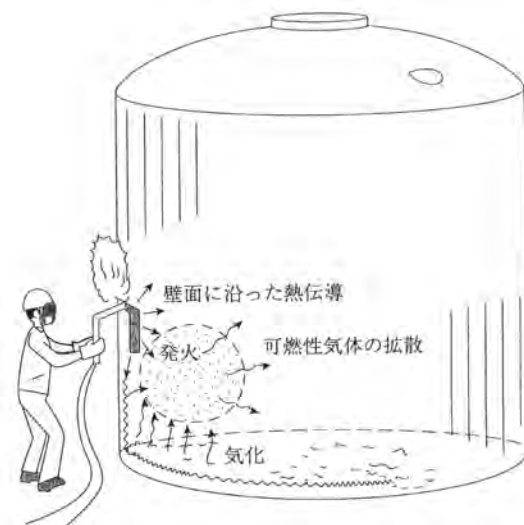


図 1 ガス溶断中のタンク内在留物の気化による爆発³⁾

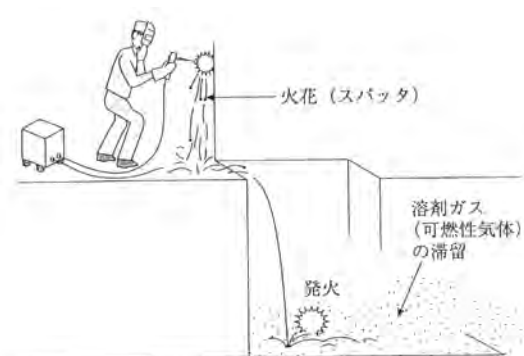


図 2 アーク溶接作業中のスパッタの飛散による爆発³⁾

† 安全工学シンポジウム 2012 (2012 年 7 月 5 日, 東京), 第 46 回安全工学研究発表会 (2013 年 11 月 29 日, 高松) で内容の一部を発表

*1 化学安全研究グループ

ては別の機会にゆずり、本稿ではガス溶断におけるスパッタの性状と飛散状況を調べたので報告する。

2 実験

1) 実験の概要

手動によるガス溶断では再現性の良い切断状況を実現できないため、固定した吹管に対して、切断する板を所定の速度で自動的に移動させて切断できる装置を製作した(図3)。これによるとスパッタの発生場所を一定にでき、観測・測定しやすくなる。産業現場での実際のガス溶断作業では、初めに板に穴を開け、縦あるいは横に切断し広げていくが、本実験装置では穴を開ける作業が難しいため、穴を開けずに板の側面から切断していくようにした。

実験では、理論的に考察したりする際に必要となる基本的なデータ収集を目的に、スパッタの移動速度と温度をそれぞれ高速度ビデオカメラ、二色温度計(赤外線放射温度計)で測定し、その後、床に落ちて冷えた粒子を採取し、顕微鏡とSEM(走査型電子顕微鏡)を用い形状と大きさを調べた。

なお、実験は労働安全衛生法におけるガス溶接技能講習を修了した者(筆者)が実施した。

2) 実験装置

用いたガス溶断器具は、アセチレン-酸素用中型切断器1型1号、火口は板厚さに応じてNo.1~No.3を使い分けた。例えば、火口No.1の寸法については、切断酸素孔(内管)の口径0.96mm、予熱炎用外管の口径2.7mmで、外管のリング状の隙間は0.25mmである。アセチレンと酸素の流量を把握するため、それぞれホース途中に流量計を設けた。ただし、アセチレンのほうは電気的あるいは金属による反応による着火防止のため、電気的に依らないフロート式の面積流量計を用いた。

切断用の板は一般構造用圧延鋼材SS400で、その寸法は長さ150mm×幅100mmで、板厚 t は6, 10, 16, 22mmの4種類とした。板は鉛直になるように小型の万力で固定し、ステッピングモーター駆動のリニアスライダに搭載して所定の速度で移動できるようにした。火口の高さは実際の作業高さを想定して、1.5mとした。

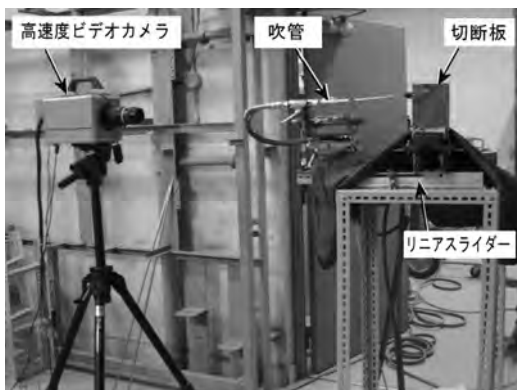


図3 切断板とガス切断器の設置の様子

実験室の床はコンクリート製である。また、実験条件に応じて床にはスパッタシート(JIS A 1323:建築工事用シートの溶接及び溶断火花に対する難燃性試験方法, A種合格品)を敷いた。用いたスパッタシートは、受けたスパッタを付着しやすいタイプのものである。

観測装置としては、高速度ビデオカメラ(フォトリオン製, SA1.1, フルフレーム1024×1024ピクセルで5,400fps, 512×512ピクセルで20,000fps, 最大675,000fps)とビデオカメラ(ソニー製, HDR-FX1000, 約112万画素, 30fps)を用いた。スパッタの発生場所付近の温度(初期温度)を測定するため、ファイバー式2色放射温度計(チノー製, IR-FAQH, 1,000~3,000℃, 応答時間0.04s)を用いた。温度計のプロブは、飛散するスパッタの付着を避けるため、約400mm離して水平に設置した。ここで板の裏面からの距離を x と定義し、プロブの焦点は $x=15$ mmの位置になるようにした。ただし、この位置を焦点とする測定径(測定範囲)は9mmに相当する。

3) 実験条件・実験方法

ガスの供給圧力(2次調整圧力)について、酸素は0.3MPa, アセチレンは0.03Mpaで一定とした。それぞれの流量は火炎の形成状況と流量計を見ながら吹管のバルブを開閉して調整、毎回の実験で流量に大きな違いが出ないように注意し、アセチレンは2.5L/min, 酸素は予熱炎と切断炎を合わせて11~12L/minとした。

切断する方向は水平である。初めは手動で予熱炎だけ形成させて板の側面を温め、赤熱してから切断炎を形成させ、ステッピングモーターを使って一定速度で板を動かす。本実験での難しい点は、火口と板の間隔、切断炎の大きさ、板の移動速度などの組み合わせを適切にしなければうまく切断できないことである。もちろん、うまく切断できなければスパッタも発生しない。切断条件設定のため、板の移動速度 V_t は300~450mm/minの範囲¹²⁾で変化させた。図4に切断跡の一例を示す。なお、切断溝の下に垂れたスラグは容易に取り除くことができる。

3 実験結果及び考察

1) 全体のスパッタの飛散状況



図4 切断跡の一例

(1) スパッタシートを敷かない場合

図5に $V_t=350$ mm/min について、切断開始（上）と中盤（下）のスパッタの様子を示す。ここで、ビデオカメラの露出時間は $1/725(=0.00138)$ s である。画面右方向にスパッタは飛散し、切断開始直後、スパッタはまっすぐからやや下向きに飛散するようになり、次第に弧を描くように落下するようになる。このスパッタの飛散の特徴は、板を切り始めるときに一番遠くにスパッタが飛散しやすいということである。目視（保護面を通して）によると、スパッタは光跡を描き、長いすじになって大量に発生しているように見える。しかし、ビデオカメラによる画像は露出時間を短く設定してあるため、水滴を吹いたように短い点となって見える。本実験と実際とではスパッタの見え方には若干の違いがある。画像解析によると、スパッタの水平方向の移動速度は $x=630$ mm において 19.8 m/s、 $2,000$ mm において 2.22 m/s である。ビデオカメラで視認できる赤熱状態のスパッタの到達距離は 3.1 m である。ただし、これは見かけの到達距離であり、数値は正確ではない。なぜなら、冷えたスパッタはビデオカメラでは捉えられず、実際はより遠くまで到達している可能性があるためである。到達時間は $10\sim 11$ コマであり、 $0.3\sim 0.37$ s に相当する。弧を描いて落下するスパッタは $x=300\sim 500$ mm の範囲に多く落ちている。 V_t を変えた場合のそれぞれのスパッタの移動速度の最大は $16.5\sim 21.0$ m/s の範囲であり、見かけの到達距離はいずれも 3.1 m であった。スパッタの移動速度は、粒子径にも依存する。板付近のスパッタの局所的な移動速度の詳細については後述する。

V_t を変えても、スパッタの到達距離はあまり変わらなかった。これは、ビデオカメラでの視認性にもよるが、アセチレンと酸素の流量を毎回一定となるように調整しているため、ガスの噴出速度あるいはスパッタの発生場所での初速度が変わらないことにも関係しているものと思われる。

(2) スパッタシートを敷いた場合

スパッタシートを敷いた場合と敷かない場合の比較を



図5 スパッタの飛散状況，上：切断開始，下：切断中盤（床の水平の白赤スケールは 0.2 m ごと）

図6に示す。スパッタシートを敷かない場合は床でスパッタが碎け、より明るくなり、跳ね返って飛散するものが見られる（円内）。スパッタシートを敷いた場合は、床でより明るくなるスパッタは少なく、跳ね返って飛散することが少ない。また、シート表面が抵抗となり、スパッタは転がりにくいことがわかる。したがって、この種のスパッタシートについては、床に落ちたスパッタの飛散、拡大を抑制する効果があることがわかる。



図6 スパッタシートの効果

2) 切断板付近のスパッタの飛散状況

(1) 概要

図7に $V_t=300$ mm/min について、板付近を拡大して高速度ビデオカメラで撮影したスパッタの様子を示す。ただし、撮影条件は $3,000$ fps である。図中の白心とは、火炎の中で火口の口元にできる白色の円すい形の部分のことを指す。画面には火口に対して背面（板の裏側、図では板の右側）に凝固したスラグの付着が認められる。これは切断した後に付いたもので切断面でのスパッタの飛散を塞いでいるものではない。すなわち、切断は画面奥（紙面奥）に向かって進んでいるもので、スラグは手前にある。画面上、球形でぼんやり見えるスパッタはカメラの焦点が合っていないものであり、中心軸に対して手前あるいは奥に飛散しているものである。スパッタの水平方向の移動速度は $x=28, 55, 76, 106$ mm において、それぞれ $10.4, 13.3, 13.8, 9.8$ m/s である。スパッタの飛散量は板厚に従って増加する。スラグの上部の表面は溶融しており、これが飛び散っているように見える。拡大して詳細に調べた様子は後節3)で述べる。

(2) スパッタの移動速度

図8に $t=6, 10, 22$ mm について、 x に対するスパッタの局所的な移動速度を示す。ただし、図示したスパッ



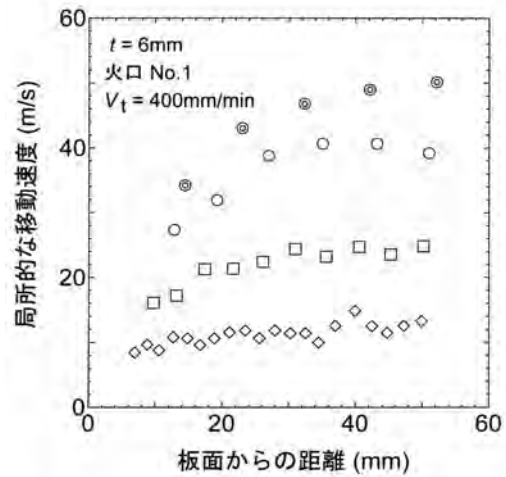
図7 切断板付近のスパッタの飛散状況⁸⁾

タは、概ね水平方向に移動するものを任意に選んだ。図(a) $t=6\text{ mm}$ について見ると、移動速度は $8\sim 50\text{ m/s}$ の範囲にあり、一様ではないことがわかる。これはスパッタの粒子の大きさによる。図中の 20 m/s に達する□印のスパッタは加速し、 $x=50\text{ mm}$ までには一定速度に達する。このような傾向は(b)の $t=10\text{ mm}$ でも同様に見られる。しかし、(c) $t=22\text{ mm}$ については、 $x=30\text{ mm}$ までは減速したり、加速したりするスパッタが見られる。これは溶融したスラグが高速気流で微粒化し、飛び散ったスパッタが切断溝から噴出する流れに追従するまでに一定の距離が必要であるためと考えられる。このような挙動は、一流体ノズルから液体が噴出し、微粒化する過程に類似している¹³⁾。

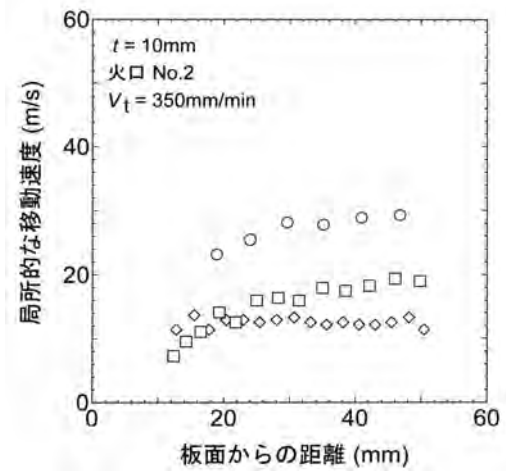
3) 切断部からのスパッタの発生の様子

切断板の断面を拡大撮影したものを図9(a)~(c)に示す。撮影では高速度ビデオカメラ専用の拡大撮影装置を装着し、保護のため石英ガラス板を前面に設置して行った。図の(a)は切断部の下側に付着したスラグの影響を受けてスパッタが噴き出している。微細となったスパッタは高速で移動している。図の(b)はスラグの影響がなく、スパッタが噴き出している状況で、液体が押し出され、下流で球形になっていることがわかる。ちょうど液柱が分裂する様式で粒子化する¹³⁾。図の(c)はスラグが切断部の上側に付着し、成長していき、重みで垂れてくる。垂れた部分は微細なスパッタとなって噴き出す。図の $t=2.5\text{ ms}$ の後の観察によると、さらにスラグは盛り上がり、液柱分裂の様式で球形となったスパッタが噴き出した。すなわち、スパッタの発生は付着したスラグの影響を受けることがわかる。また、スパッタの大きさは一様ではないこともわかる。

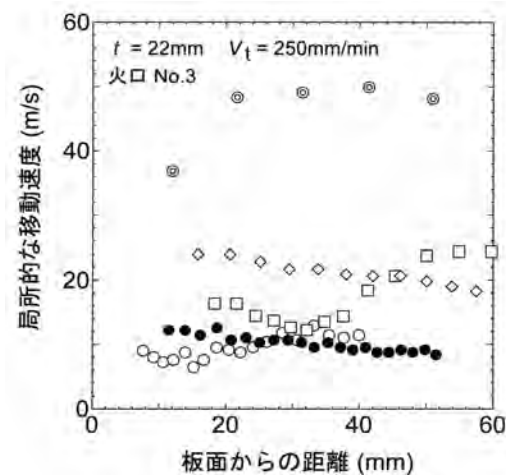
切断面での流動は非常に明るいため、その詳細には不明な点があるが、濃淡画像からは移動速度は 6 から 8 m/s 程度と推定される。



(a) $t=6\text{ mm}$



(b) $t=10\text{ mm}$



(c) $t=22\text{ mm}$

図8 切断板表面からの距離に対する局所的な移動速度

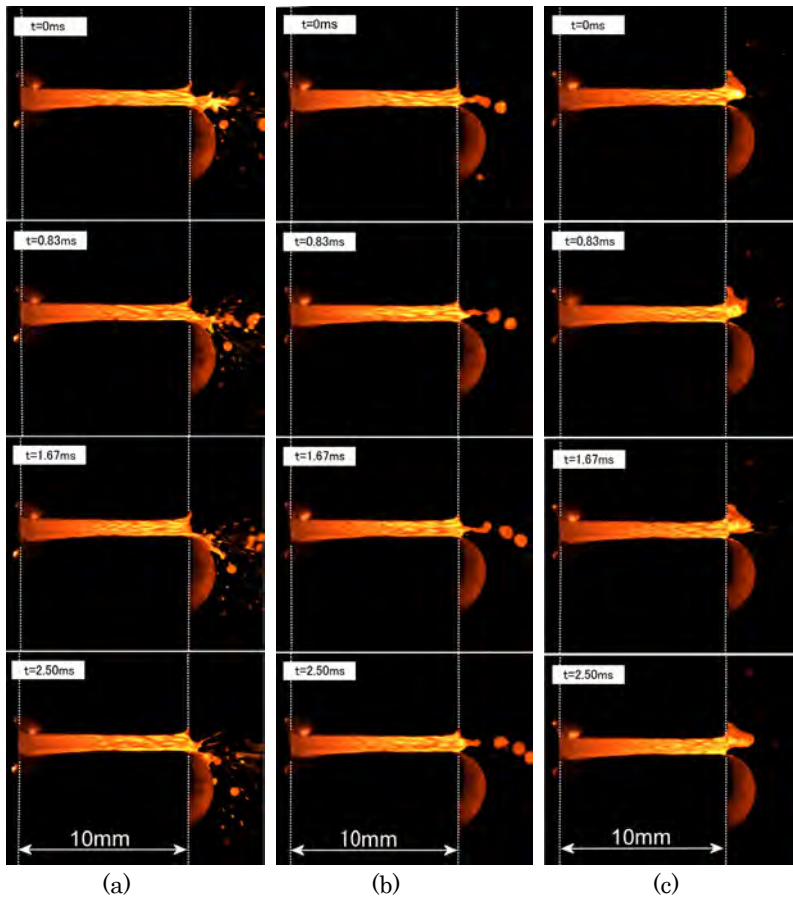


図9 切断断面でのスパッタの発生の様子

4) 切断板付近の温度

スパッタの温度測定用の放射温度計の信号は、アナログ出力によってデータロガーに記録した。図10に記録される温度変化の一例を示す。温度測定によると、a)スパッタの飛散に対応する単発的な温度変化と、b)成長した下側のスラグの溶融に対応する連続的な温度変化が見られることがわかった。4種類の板厚について各4回測定を実施し、各々最高温度を求めたところ、a)については1,191℃から2,273℃の範囲、b)については2,067℃から2,494℃の範囲にあり、ばらつきが見られた。温度測

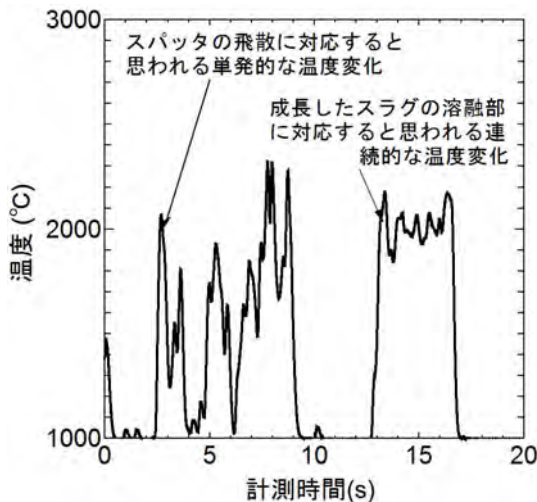


図10 記録される温度変化の一例

定における最高温度は、溶融スラグについては2,494℃である。非定常場でのスパッタの温度について、単発的に立ち上がる温度の変化から推定すると、スパッタの初期温度は2,200~2,300℃程度である。スパッタの温度について、HoelemannとWorpenbergの実験結果⁷⁾の1,600~1,950℃、田中の実験結果¹⁰⁾における平均温度が2,103℃と比較すると、本実験の温度はそれらよりも高いことがわかる。

5) x=2,000 mm における床付近のスパッタの飛散状況

スパッタシートを敷かない場合について、スパッタの床での跳ね返りや転がりなどの様子を調べるため、x=2,000 mm における床付近を撮影できるように低い位置に高速度ビデオカメラを設置した。ビデオ画像をもとに、床付近でのスパッタの動きを図11に模式的に示す。典型的にはAとBのようなスパッタの動きがあり、Aは床で跳ね返り、転がっていくもので、Bは床で散って微細化するものである。Bは床に達するまでは粒子の外表面は赤熱しておらず、ビデオカメラでは捉えにくい。散るとともに赤熱し、容易に捉えることができる。Aの跳ね返りを見ると、粒子表面は床面到達前に凝固し、一定の硬さを有する粉体となっていることが推測される。すなわち、凝固したスパッタ（しかし、赤熱していないが、高温状態にある）が跳ね返り、転がり抵抗が小さい球であることが遠くに飛散する原因の一つと考えられる。火災発生の原因に関して、高所からの危険なスパッタの飛散例をまとめたものによると、スパッタは思いがけない範囲に飛散することが知られている⁴⁾。

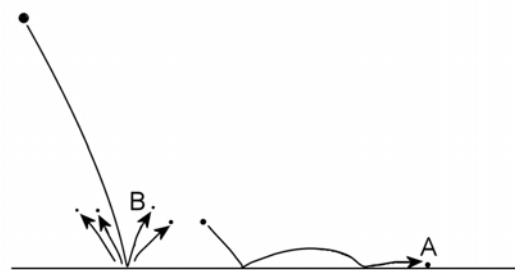


図11 スパッタの床での動きの例

6) 粉体としてのスパッタの特性

(1) 粒子形状と粒子径

図12に採取したスパッタのSEM画像を示す。粒子は球形に近く、表面は平滑であることがわかる。ただし、

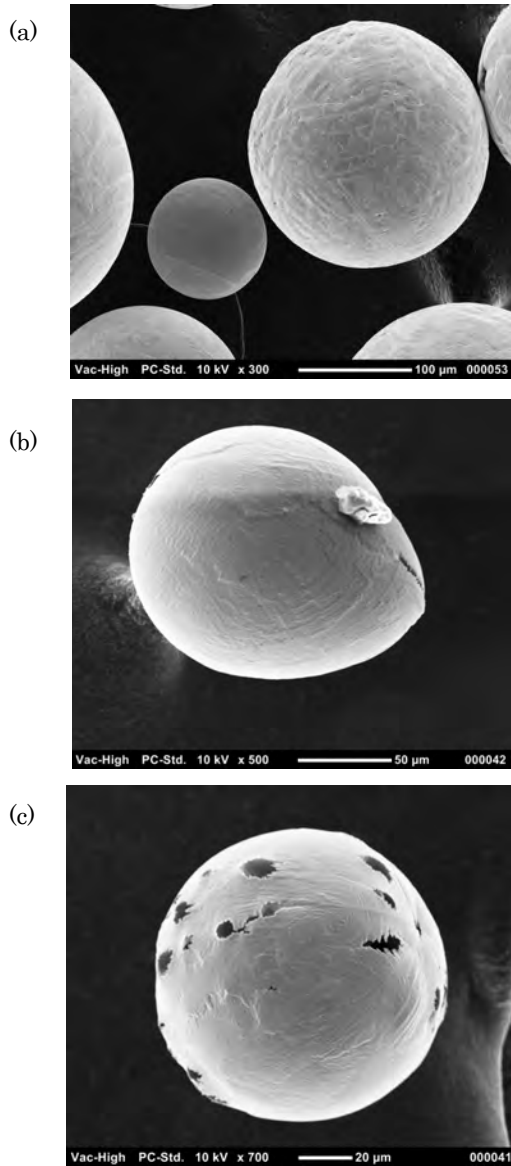
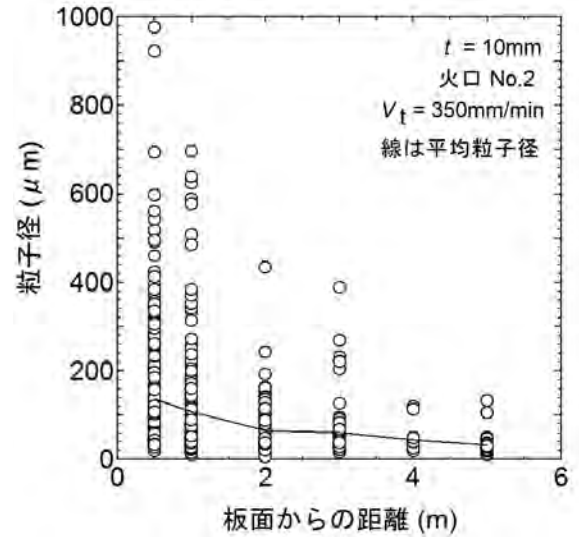


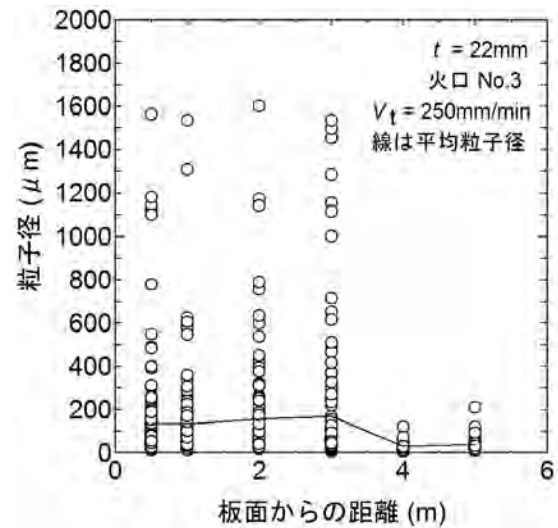
図12 スパッタのSEM画像の例

図(c)では傷や付着物が見られる。

x と粒子径の関係を図13に示す。ただし、採取では、スパッタの動きに支障がないように薄いステンレス板を受け板として用いた。この測定では、床で跳ね返ったいわゆる二次粒子も含んでいることに注意する。粒子径に広い範囲でばらつきが見られるが、平均すると、(a)の $t=10\text{ mm}$ の場合、 $x=0.5, 2, 4\text{ m}$ に対する平均粒子径は、それぞれ139, 66, 44 μm であった。(b)の $t=22\text{ mm}$ の場合、 $x=0.5, 2, 4\text{ m}$ に対して同様に、それぞれ135, 158, 31 μm あった。両方の板厚に対して、切断板から近い $x=0.5\text{ m}$ の距離での平均粒子径に違いはないが、 $x=2\text{ m}$ では厚い切断板のほうが平均粒子径は大きかった。ばらつきが大きくなるのは、大きな粒子が床に衝突してはじけ、細かい粒子になることも関係している。このとき、二次粒子は切断板に近い方向と遠い方向に跳ね返って転がっていくものが見られる、不規則的な挙動を示し、距離と粒子径に関する考察は容易ではないことがわかっ



(a) $t=10\text{mm}$



(b) $t=22\text{mm}$

図13 切断板表面からの距離に対する粒子径

た。

(2) 密度

粒子の密度測定では、ふるい分けを行い、大粒径(目開き425 μm 超:1,720 μm)と中粒径(目開き75 μm 超250 μm 以下:176 μm)と大まかに分類し、次の方法で実験的に求めた。(a)粒子群の全質量と粒子群の各々粒子の寸法を測定し、単純に単一球と仮定して求める方法。(b)液浸法(液体ピクノメータ法)¹⁴⁾により、既知の液体に粒子群を浸し、その体積から求める方法。

温度21 $^{\circ}\text{C}$ において、得られた結果は次の通りである。

大粒径については、(a)によると1,750 kg/m^3 、(b)によると、3,280 kg/m^3 、中粒径については、(a)によると4,280 kg/m^3 、(b)によると4,860 kg/m^3 であった。大粒径の粒子の密度のほうが中粒径のそれよりも小さく、中粒径の粒子については、(a)と(b)の測定法の違いは小さく、中粒径は球形のものが多いことがわかった。大粒径の粒子については球形とは仮定できず、液浸法での測定が妥当で

あると考えられる。ただし、得られたいずれの値も酸化鉄の比重¹⁵⁾5.1～5.2よりも小さかった。

(3) 反発係数

冷えて常温となった粒子の反発係数 e を跳ね返り高さから求めた。

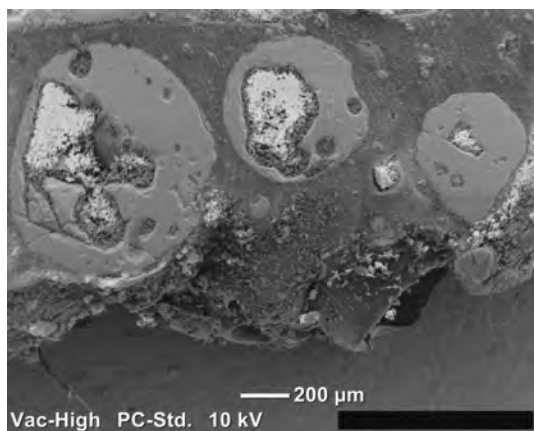
$$e = (h_2 / h_1)^{0.5} \quad (1)$$

ただし、 h_1 と h_2 はそれぞれ、粒子の跳ね返り前後の高さである。実験は 25 cm 高さからピンセットで挟んだ粒子を研磨して平滑にした SS400 の板 ($t=22$ mm) あるいはそれにスパッタシートを敷いた面に落とし、その動きを高速度ビデオカメラで撮影して調べた。実験の高さは、便宜上、高速度カメラの撮影範囲で粒子が撮影できるように定めたものである。また、撮影しやすい大きな粒子を用いるように、ふるいわけで $425 < 1,000 \mu\text{m}$ 範囲のものを用いた。

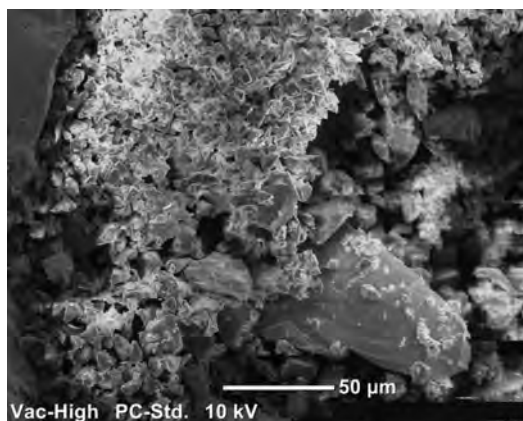
測定の結果、 e は SS400 板上では 0.789、スパッタシート上では 0.356 であった。冷えて固まった粒子はスパッタシートを使わなければ跳ねやすいことがわかる。

(4) 断面の SEM 観察

大粒径の粒子について、粒子を樹脂で包埋し、イオンミリングで研磨した後、粒子断面を SEM 観察した様子を図 14 に示す。粒子の中には空洞が見られることがわかる。さらに拡大すると、空洞内で結晶化している様子が見られる。このような空洞は既に最上ら¹¹⁾が観察して



(a)全体



(b)拡大

図 14 大粒径の粒子の断面の様子 (SEM 撮影)

いるが、このような空洞の存在によって大きな粒子ではあるものの、密度が小さい原因の一つになっていると考えられる。

SEM 観察によると、 $x=1,000$ mm においては球形以外にも二つの粒子が結合し、縦長になった形状のものも見られる。この位置は大きなスパッタが床で散って微細化したり、粒子が再結合し、温度が高いため合一し、大きな一つの粒子になったりするため、粒子径のばらつきが大きい。すなわち、スパッタは切断場所から広がりを持って飛散するため、距離とともに粒子の数は減少する。

7) 鉛直下方に切断した場合

本研究では、鉛直下方に切断した実験は行わなかった。田中の研究¹⁰⁾では鉛直方向に落下距離を 0.2～5.5 m まで変えて調べ、平均粒子径は 0.409 mm であった。粒子径は本実験のものよりもかなり大きいことから、スパッタの飛散方向の影響が見られることは明らかである。鉛直落下の場合は、板に付着した溶融したスラグが落下しやすくなり、大きな粒子のまま落下し、床で微細化するが、付近の粒子が再結合し、粒子が大きくなるものと考えられる。

4 おわりに

本研究では、アセチレン-酸素のガス溶断で鋼材を切断する際に発生するスパッタについて、発生状況、移動速度、温度、床に落ちて冷えた後の粒子径と密度などを調べた。実験では、一般構造用圧延鋼材 SS400 で板厚の異なる 4 種類 (6, 10, 16, 22 mm) の板を用いた。得られた結果は次のとおりである。

- ①切断面からスパッタが噴き出す様子を高速度ビデオカメラで撮影し、詳細に観察した。スパッタの発生は、試料板の背面に付着した溶融したスラグの影響を受け、一流体ノズルから液体が噴出する流れに類似している。
- ②飛散するスパッタの初期温度は 2,200 から 2,300°C であると推定される。
- ③スパッタの移動速度は、切断面から離れるに従い加速し、10～50 m/s である。ただし、移動速度は粒子の大きさによって異なる。
- ④切断高さが 1.5 m の場合、赤熱したスパッタの見かけの到達距離は 3.1 m である。しかし、5 m の位置でスパッタが採取されることから、5 m を超えて飛散するものもある。
- ⑤スパッタを床から採取して粒子形状、粒子径、密度、反発係数、粒子断面などの物性を調べた。冷えたスパッタの平均粒子径は 1 mm 以下のものが多いが、試料の板厚とともに大きいものも見られる。スパッタは溶融状態と室温まで冷えた状態とでは粒子径や密度など物性が異なるはずで、着火性に及ぼす物性の違いは今後の検討課題である。
- ⑥スパッタを受けとめ、付着しやすいタイプのスパッ

タシートは、床に落ちたスパッタの飛散、拡大を抑制する効果がある。

スパッタによる可燃性ガス・蒸気の着火性に関しては別の機会に報告したい。

参 考 文 献

- 1) 板垣晴彦, 労働災害データベースによる分析—溶接・溶断作業中の事故事例—, 第44回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.53-54, 2011
- 2) 京都市消防局, 火災原因調査シリーズ(47)・地下タンク火災—地下タンクの撤去中に発生した火災について—, 消防科学と情報, No.91, pp.70-73, 2008
- 3) 八島正明, 爆発・火災を起こさないための基礎知識 第4回—爆発と火災の概要—, 化学装置, Vol.50, No.7, pp.90-98, 2008
- 4) 東京消防庁調査課, 溶接機および溶断機に起因する火災, 溶接技術, pp.41-44, 1981
- 5) 中央労働災害防止協会編, ガス溶接・溶断作業の安全, ガス溶接技能講習用テキスト, 中央労働災害防止協会, 2011
- 6) 桶川貞夫, 渡辺弘吉, 池田恒彦, 星野藤六, 溶接火花の飛散範囲とガス着火, 安全工学, Vol.5, No.2, pp.112-119, 1966
- 7) Hoelmann, H. and Worpenberg, R., Brandursache schweissen, brennschneiden und loeten-reichweite und zuendpotential gluehender partikel, VFDB Z Forsch Tech Brandschutz, Vol.41, No.2, 79-84, 1992
- 8) 田中好一, 南斉清己, 井田晋, 西脇信彦, 堀三計, 炭酸ガスアーク溶接時に発生するスパッタの飛散挙動, 溶接学会論文集, Vol.20, No.3, pp.363-368, 2002
- 9) 萩原隆一, 山野寛治, 西田佳嗣, 溶接火花による可燃物の着火危険性: 火災, Vol.32, No.5, pp.8-12, 1982
- 10) 田中敏: 溶接火花による可燃物への着火性, 科学警察研究所報告, pp.51-58, 1977
- 11) 最上和生, 斎藤修二, 牧下 寛, SEM及びEDSによるスパッタの識別, 科学警察研究所報告 法科学編, Vol.42, No.1, pp.29-38, 1989
- 12) 一社)日本溶接協会ホームページ: ガス切断の実技ビデオ <http://www-it.jwes.or.jp/gas/index.jsp> (2015年6月19日アクセス)
- 13) 日本機械学会, 燃焼工学ハンドブック, 丸善, pp.39, 1995
- 14) 粉体工学編, 粉体の基礎物性, 日刊工業新聞社, p.56-57, 2005
- 15) 化学大辞典編集委員会編, 化学大辞典 3 (ク-サ), 共立出版, p.923, 1963