

ゴミ焼却プラントにおける機械的切断技術

加藤 政利* 徳山 文祐**

要 旨

近年、国内の地方自治体において、旧ゴミ焼却施設の解体工事が増加している。しかし、一連の解体作業においては、解体に着手する前に焼却プラント内部を洗浄する必要があり、そのための人通孔を設けなければならない。そこで本研究では、人通孔の開口方法として当該機器が軽量かつコンパクトで短時間に開口することが可能な機械的切断方法(チップソーおよびグラインダー)が有効であると判断し、その切断刃の違いによる鋼材の表面および内部温度の上昇状況を把握するための実験を実施した。

その結果、鋼板の切断時において広範囲に広がる温度伝達を抑えるためには、グラインダーよりもチップソーが有効である。チップソーおよびグラインダーの切断刃に関係なく、鋼板の切断線上の温度は高温状態になるものの瞬時である。また、この高温に伴う鋼板内部の局所的な組織変化は発生せず、大部分の温度は 200 以下となることから、高温の熱伝達はないものと判断される。切断刃に水を噴霧する水冷方式は、鋼板全体の温度上昇を抑制するのに有効である。

1. はじめに

一昨年、ゴミ焼却施設等から排出される高濃度のダイオキシン類が新聞やテレビ等のマスコミで報道され、大きな社会問題となった。旧厚生省はダイオキシン類の削減を最大の目標として、平成 9 年 1 月に「ごみに係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン」を公表¹⁾し、同年 5 月には「ごみ処理広域化計画」の策定を通告した。更に、平成 12 年 1 月には「ダイオキシン類対策特別措置法」(以降、特別措置法と記す。)が施行され、ダイオキシン類の排出基準が大幅に強化された。その結果、排出基準値を越えかつ耐用年数が経過して更新時期を迎えているゴミ焼却施設については、改造または廃止を進めている。また、厚生労働省はゴミ焼却プラントや施設の解体時におけるダイオキシン類の汚染拡大を防ぐとともに、作業従業員の暴露(人体への二次汚染)を防止することを前提として、平成 13 年 4 月に「廃棄物焼却施設内作業におけるダイオキシン類暴露防止対策要綱」を公表²⁾し、ダイオキシン類の存在が認められない場合以外はゴミ焼却施設の解体工事において鋼材の溶断を禁止した。

このような状況の下、全国の地方自治体では特別措置法に合致しないゴミ焼却施設に対し解体を検討しているものの、これらゴミ焼却施設の大部分は鋼構造(鉄骨)建物であるため、これまでのようなガス溶断以外の解体工法が要求されている。

しかしながら、ゴミ焼却施設に対する一連の解体作業において最初に発生するのがゴミ焼却施設内部の焼却炉や集塵機等(以降、焼却プラントと記す。)の洗浄である。そのため、洗浄作業員が焼却プラント内部に入るためには、作業効率の良い位置に人通孔を事前に開口する必要があり、開口作業に伴う二次汚染を防止することが最重要課題となってきた。したがって、ゴミ焼却施設の解体時における作業員への暴露防止対策として、機械的切断方法^{4), 5)}が挙げられるものの、機械的切断時における鋼材の温度上昇は予測不能であるばかりか、学術的な研究報告も見受けられない。

そこで本研究では、焼却プラントにおいてダイオキシン類の気化を最小限に抑えながら人通孔を開口する一技術として機械的切断技術を取り上げ、機械的に切断する際の鋼材表面、切断機と鋼材の接触部(切断境界部)、およびその鋼材周辺(表面および内部)の温度上昇を実験的に把握することを目的とした。

表 - 1 鋼材の機械的性質

種 類	板厚 (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	YR (%)	EL (%)	Hv
SS400	3.2	390	507	76.9	32	145.6
	6.0	287	392	73.2	44	111.9

σ_y : 降伏応力, σ_u : 引張強度, YR: 降伏比, EL: 伸び,
Hv: ビッカース硬度 (荷重: 98.067N)

*建築エンジニアリング部 **環境事業部

2. 実験計画

2.1 鋼板の選定

本実験に用いる鋼板は、ゴミ焼却施設内の焼却プラントを構成している部材として広く使用されている鋼板を考慮し、200×200mmの正方形鋼板で板厚3.2mmと6.0mm（共にSS400鋼材）の2種類を用いた。なお、これら鋼材の機械的性質を表-1に示す。

2.2 切断刃の選定

焼却プラントの開口作業で高熱を発生させないように開口する方法としてウォータージェットが考えられる。しかし、このウォータージェットは付属機器が大型で運搬効率が悪く、設置場所の確保が難しいばかりか、高水圧で危険を伴う作業であることから、焼却プラントにおける人通孔のように少規模の開口作業としては有効な切断方法ではないと思われる。

そこで本実験では、軽量かつコンパクトで短時間に開口することが可能な機械的切断の刃として、チップソーとグラインダーの2種類を用意した。この切断機に用いたチップソーとグラインダーの各刃を写真-1に示す。

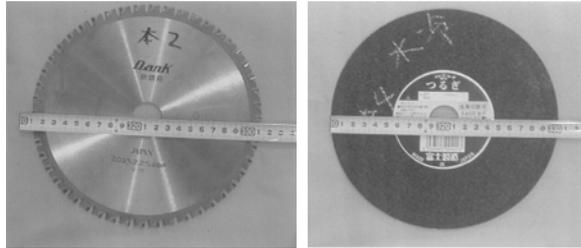
2.3 実験パラメータおよび実験概要

本実験のパラメータは、鋼板の板厚の違い(3.2mmと6.0mmの2種類)、切断機の違い(チップソーとグラインダーの2種類)、送り方式の違い(自動送りと手動送りの2種類:実施工時を考慮)、切断条件の違い(乾式と水冷式の2種類)の4項目を設定し、表-2のように組合せた計6体の試験体を用意した。

鋼板の切断は、図-1に示すように片側から180mmまで切断するように計画した。なお、手動送りの場合で切断機の切断速度に大きな変化が起きた時は、途中で切断を中止することとした。この実験状況を写真-2に示す。

鋼板の切断速度は、自動送りの場合は約2.5mm/secに設定し、手動送りの場合は職人に委ねた。なお、各鋼板の切断時間はストップウォッチにより計測した。

切断時の鋼板温度は、鋼板の表面を計測する箔タイプの熱電対と、鋼板内部を計測するシースタイプの熱電対の2種類を図-1に示す位置に設置し、0.5秒毎に温度測定を行うことにした。なお、箔タイプの熱電対は-50～500の温度を、シースタイプの熱電対は-50～1,200の温度を計測することが可能である。



(a) チップソーの場合 (b) グラインダーの場合

写真-1 鋼材の機械的切断に用いる切断刃

表-2 実験パラメータ表

試験体名称	板厚(t)	刃の種類	送り方式	切断条件	備考
SP32TAD	3.2mm	チップソー	自動送り	乾式	鋼種: SS400
SP60TAD	6.0mm				
SP32GAD	3.2mm	グラインダー		水冷式	
SP32GAW					
SP32TMD	3.2mm	チップソー	手動送り	乾式	
SP32GMD		グラインダー			

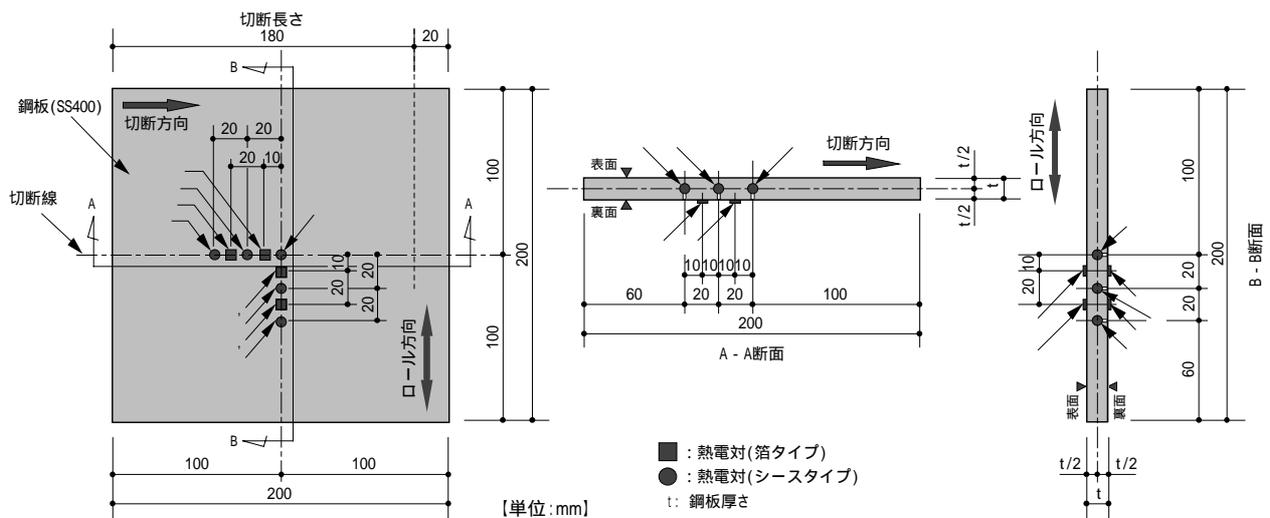
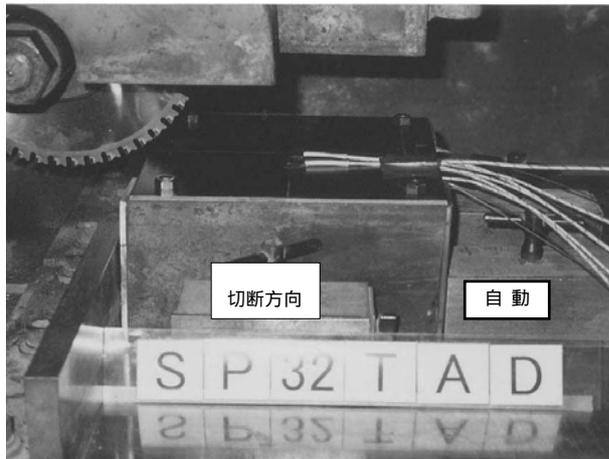


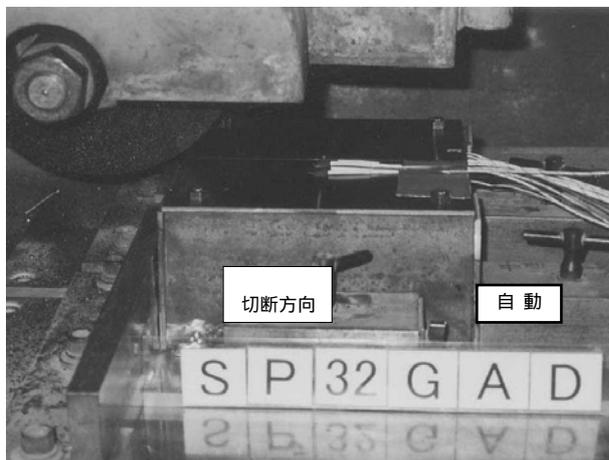
図-1 試験体の概要および熱電対の設置位置



(a) SP32TAD 試験体の場合



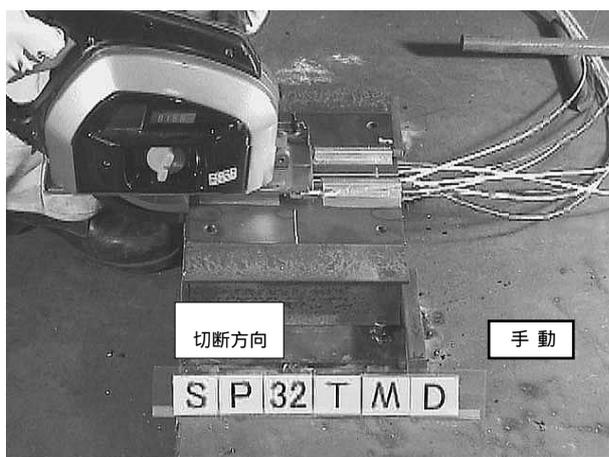
(b) SP60TAD 試験体の場合



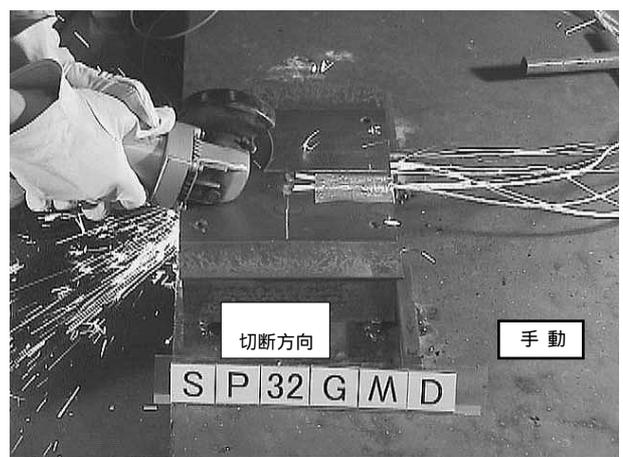
(c) SP32GAD 試験体の場合



(d) SP32GAW 試験体の場合



(e) SP32TMD 試験体の場合



(f) SP32GMD 試験体の場合

写真 - 2 各試験体の切断実験状況

3. 実験結果および考察

本実験で行った鋼板の切断時間および図 - 1 で示した熱電対により計測した各計測点の温度を表 - 3 に示す。ここで、同表の ~ の温度は切断線上の切断温度を、 ~ の温度は切断線上の点と垂直方向に伝達して行く温度分布を把握しようとしたものである。なお、同表中の値は、各計測点の最高温度を示している。

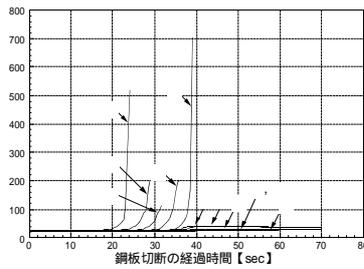
表 - 3 から、自動送りの場合の切断速度は計画通り 2.53 ~ 2.61 mm/sec の範囲で切断したことが確認できる。一方、手動送りの場合、チップソーの切断速度は 3.24 mm/sec と比較的高速であるのに対し、グラインダーの切断速度は 1.71 mm/sec と低速であった。これは、グラインダーは刃全体が砥石であるため、鋼板との摩擦抵抗がチップソーより大きく、自動送りは機械的に切断速度を調節できたものの、手動送りではこの摩擦抵抗によって切断速度に差が生じたものと考えられる。

温度計測の結果から、切断線上(~)の温度はチップソーの場合、703.8 ~ 1,052.2 と高温状態になる傾向にあるのに対し、グラインダーの場合は 303.8 ~ 490.2 であり、チップソーの約半分になる傾向が見られた。一方、垂直方向(~)の温度はチップソーの場合、20.8 ~ 42.9 であるのに対し、グラインダーの場合は 45.3 ~ 122.2 であり、チップソーの約2倍になる傾向が見られた。なお、グラインダーで水冷式の場合 (SP32GAW) は 22.9 ~ 39.9 で、他のグラインダーの乾式と比較すると約半分となる傾向が見られた。これら温度計測の結果を経過時間で示したものが、図 - 2 である。ここで切断機の刃の違いによる温度上昇の違いは、チップソーは刃先でチップ状に削りながら切断するため、刃先近傍で高温状態になる。一方、グラインダーを用いた場合は刃全体で粉状に削りながら切断するため、広範囲に摩擦熱等が伝搬したものと考えられる。

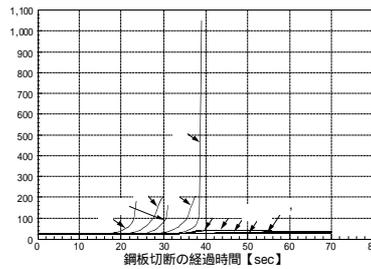
表 - 3 鋼板の切断時間および各計測点の最高温度

試験体名称	板厚 (mm)	切断長さ (mm)	切断時間 (sec)	切断速度 (mm/sec)	各計測点の最高温											
					[内部]	[表下部]	[内部]	[表下部]	[内部]	[表上部]	[表下部]	[内部]	[表上部]	[表下部]	[内部]	
SP32TAD	3.2	180	70.15	2.57	518.9	196.8	112.1	203.0	703.8	41.1	42.9	33.3	29.7	29.8	27.4	
SP60TAD	6.0	180	70.10	2.57	182.5	206.9	164.9	204.0	1,052.2	42.7	41.0	33.1	30.1	30.2	28.0	
SP32GAD	3.2	180	71.15	2.53	213.1	214.0	170.0	345.6	236.9	115.2	106.6	67.9	54.9	51.2	45.3	
SP32GAW	3.2	180	68.95	2.61	255.1	303.8	255.6	289.9	207.2	33.3	39.9	25.7	23.7	23.9	22.9	
SP32TMD	3.2	151	46.60	3.24	1,027.8	428.4	387.3	—	—	30.6	32.3	25.0	22.9	23.2	20.8	
SP32GMD	3.2	180	105.13	1.71	324.6	490.2	463.4	420.7	220.4	122.2	111.9	79.4	60.7	57.7	45.9	

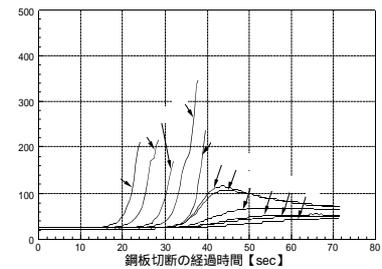
：熱電対の不調により計測不能



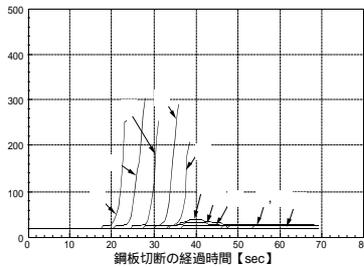
(a) SP32TAD 試験体の場合



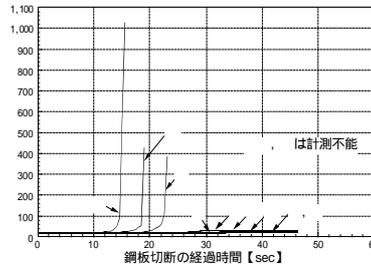
(b) SP60TAD 試験体の場合



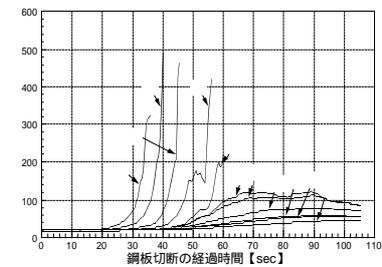
(c) SP32GAD 試験体の場合



(d) SP32GAW 試験体の場合



(e) SP32TMD 試験体の場合



(f) SP32GMD 試験体の場合

図 - 2 鋼板の表面または内部温度と経過時間との関係

3.1 鋼板切断時の温度分布

本実験で得られた鋼板切断時の温度分布を図-3に示す。なお、同図の最高温度は、同一試験体内の切断線上で、表-3に示す ~ の中で最も温度の高い値を採用した。また、温度分布を予測するための統計処理を行う際、切断線上を原点とすると曲線近似が困難であるため、切断刃近傍として切断線から0.001mm離れた位置を最高温度とした。

同図から、チップソーの場合は累積近似で処理すると決定係数は $R^2 = 0.9988 \sim 0.9999$ となり、各式で切断時の温度分布を予測することができる。グラインダーの場合は対数近似で処理すると $R^2 = 0.9854 \sim 0.9983$ となり、各式で切断時の温度分布を予測することができる。

3.2 鋼板の硬度分布

実験終了後の鋼板を用いた硬度試験⁵⁾結果を図-4に示す。同図中、(a)はチップソーを用いた場合を、(b)はグラインダーを用いた場合の硬度分布を示している。なお、硬度試験を行った試験片は冶金分析を行う試験体(抜取り位置は図-5参照)と同一である。

同図から、切断刃の違いに関係なく、全ての試験体において切断面近傍の硬度が局部的に高くなるものの、その他の位置はほぼ一定になる傾向が確認できた。なお、同図中(a)のSP60TAD試験体は他の試験体の硬度に比べて低くなる傾向にあるものの、実験前の硬度(Hv)とほぼ同値(表-1参照)であり、切断による影響ではないと判断できる。

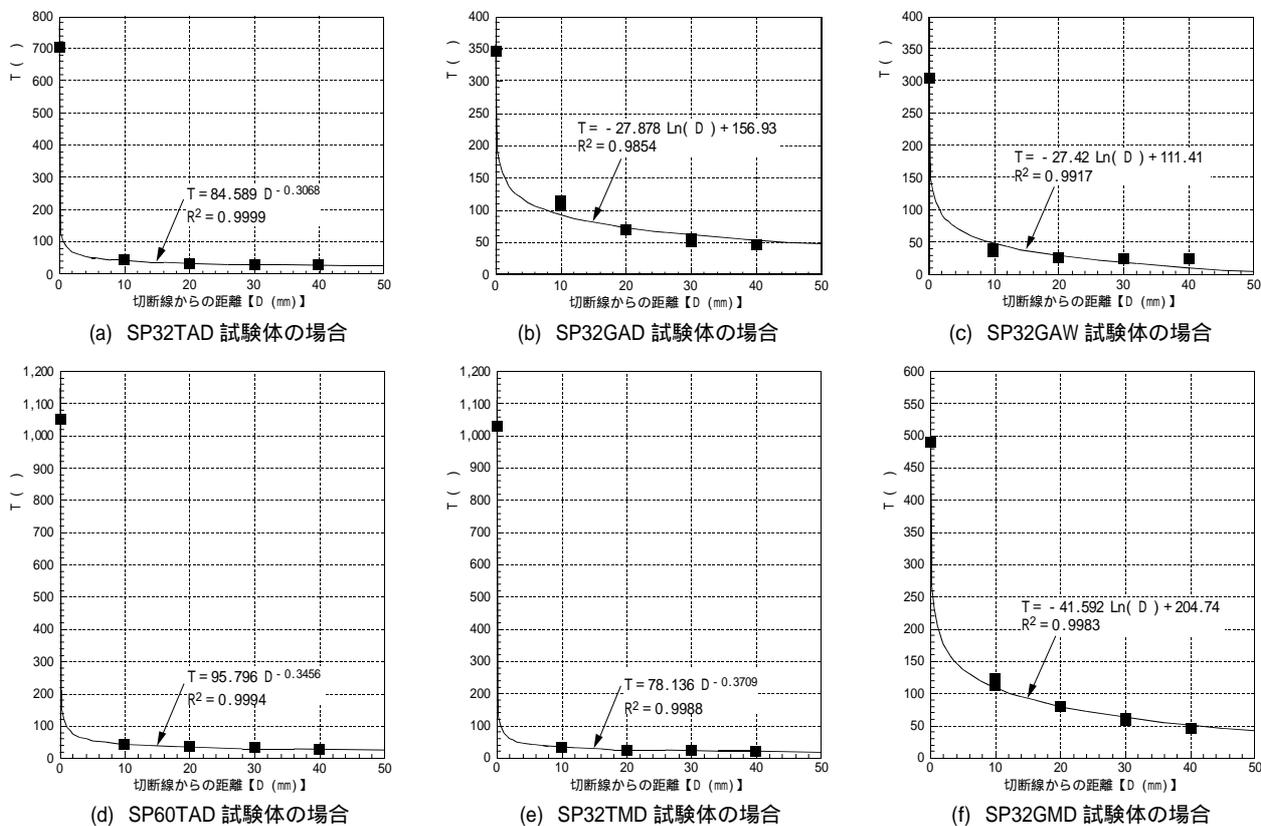


図-3 鋼板の表面または内部温度と切断線からの距離との関係(温度分布)

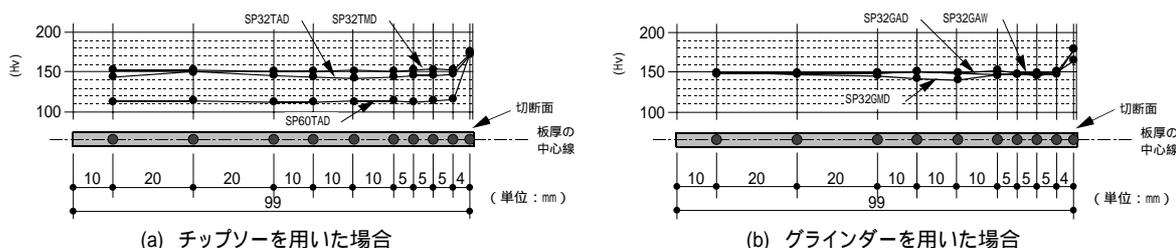


図-4 実験終了後の試験体を用いた鋼板の硬度分布

4. 冶金分析について

本研究の特徴は、ゴミ焼却施設の解体における初期段階において、洗浄作業員が焼却プラント内部に入るための人通孔を機械的に切断する際、焼却プラント内部に残留するダイオキシン類の気化を低減することである。しかし、ダイオキシン類の熔融温度³⁾は 196.5 以上であるのに対し、本実験の温度計測結果では切断線上で瞬間的に最大 303.8 ~ 1,052.2 に達している。

そこで本研究では、実験終了後の鋼板を用いた顕微鏡による組織撮影⁶⁾および画像分析⁶⁾を行い、一般的に知られている金属の特徴から鋼板の切断挙動を把握するとともに、鋼板の切断面が持続的な高温状態にならず瞬時的であることを検証する。

4.1 顕微鏡による組織撮影計画

切断刃の違いによる鋼板の抵抗と切断面(切欠き面)近傍の組織変化を把握するため、投影機によるマクロ組織(倍率; $\times 5 \sim 50$)と光学顕微鏡によるミクロ組織(倍率; $\times 100 \sim 500$)を写真撮影することにした。なお、硬度分布と整合させるため、同一試験片の断面を使用することとした。

この顕微鏡による撮影面は、**図 - 5**に示す試験箇所断面とし、各組織の撮影箇所は**図 - 6**に示す通りである。

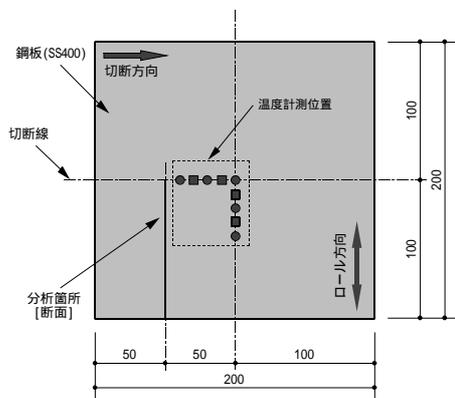


図 - 5 実験終了後における鋼板の冶金分析箇所

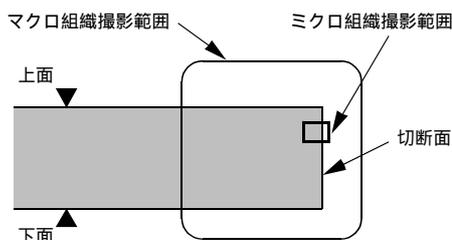


図 - 6 顕微鏡による写真撮影箇所

4.2 顕微鏡による組織撮影結果

顕微鏡による組織の写真撮影結果を**写真 - 3 ~ 6**に示す。ここで、**写真 - 3**は 3.2mm の鋼板を、**写真 - 4**は 6.0mm の鋼板をチップソーで切断した場合の組織を示している。また、**写真 - 5**は 3.2mm の鋼板をグラインダーで切断した場合の組織を、**写真 - 6**は 3.2mm の鋼板を水冷しながらグラインダーで切断した場合の組織を示している。なお、各写真内の写真(a)はマクロ組織を示し、写真(b)は写真(a)内の で囲んだ範囲のミクロ組織を示している。画像分析(c)は写真(b)における鋼板のメタルフローを 5 ~ 10 層ごとにまとめて図化した画像分析結果を示している。

各写真内の写真(a)から、全ての試験体において切断面近傍はせん断切断のように上面の一部が大きく湾曲し、下面にはバリが付いていることが確認できる。また、この切断面近傍では、少し黒墨んだ色の変化が見られるものの、特に大きな変化は認められない。

各写真内の写真(b)から、チップソーで切断した場合の切断面は、針状の集まりとなり、引き千切られたような形跡を残している。これは、チップソーの切断機構に依存していると思われる。なお、どの試験体においてもメタルフローを鮮明に確認することができ、切断時の摩擦熱等による溶融や再結晶化は認められなかった。また、切断面近傍ではメタルフローの間隔が密になっていることから、**図 - 4**に示した硬度分布においても、切断面近傍の硬度が他に比べて高くなる傾向を示したと思われる。

各写真内の画像分析(c)から、**写真 - 3, 4**のチップソーで切断した場合、切断面近傍のメタルフローは切断面にほぼ平行となるまで大変形している。一方、**写真 - 5, 6**のグラインダーで切断した場合、メタルフローの傾きはチップソーに比べて緩やかであった。

4.3 溶接熱による組織変化の確認

本研究では、溶接等の高熱における組織変化を確認するため、本実験ではSP32TMD試験体の一部に隅肉溶接を施し、マクロ組織およびミクロ組織の画像を撮影した。その結果を**写真 - 7**に示す。

同写真(b)から、溶接金属に隣接するボンド近傍では溶接熱⁷⁾(1,300 ~ 1,500 の範囲に加熱)によりフェライトの成長過程である針状フェライトが表われている。同写真(c)から、熱影響部⁷⁾(HAZ: 900 ~ 1,100 の範囲に加熱)は結晶粒が微細となっている。一方、同写真(d)に示す母材の組織は、**写真 - 3 ~ 6**の組織と比較しても特に変化は認められない。よって、機械的切断による高温の熱伝達は起こらず、結晶変化は発生しなかったものと考えられる。

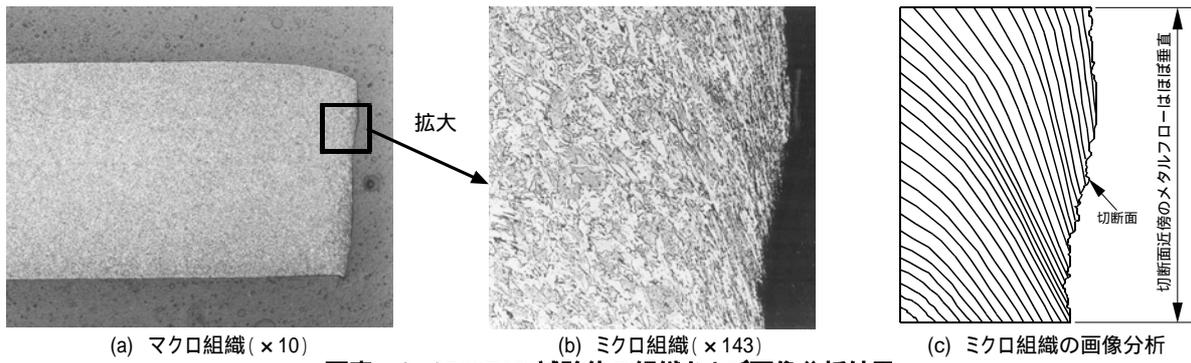


写真 - 3 SP32TAD 試験体の組織および画像分析結果

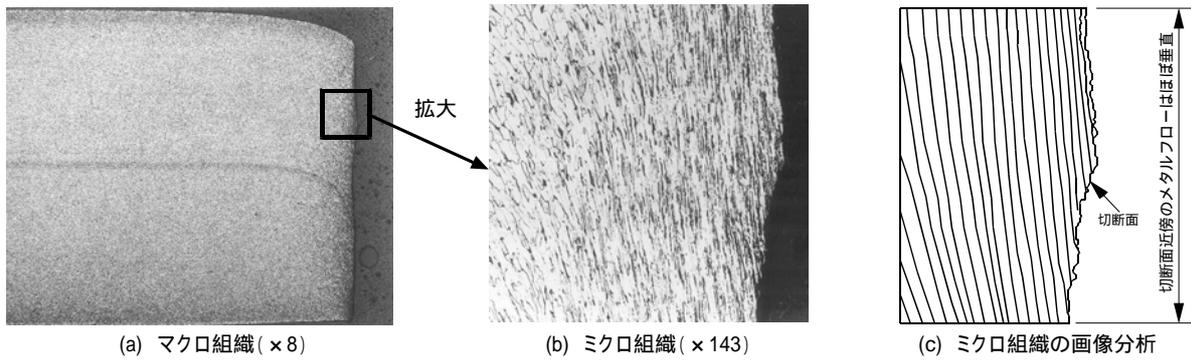


写真 - 4 SP60TAD 試験体の組織および画像分析結果

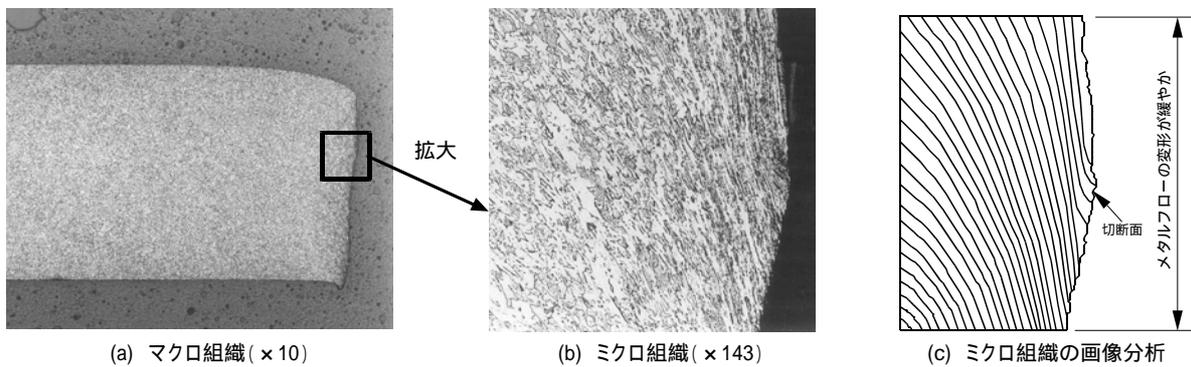


写真 - 5 SP32GAD 試験体の組織および画像分析結果

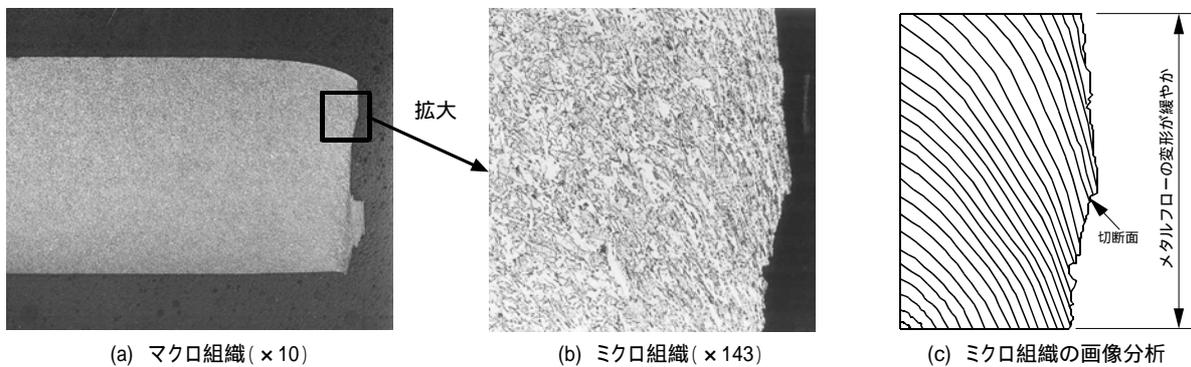


写真 - 6 SP32GAW 試験体の組織および画像分析結果

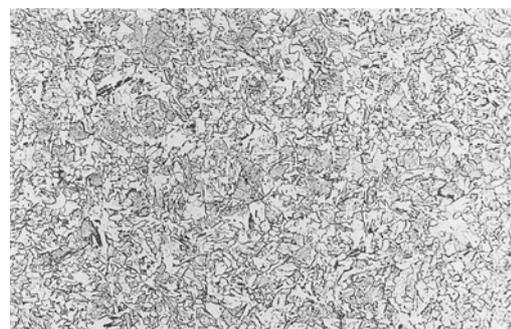
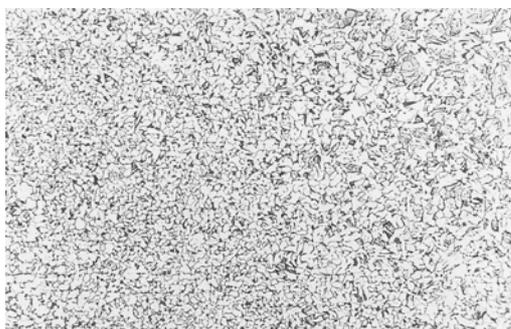
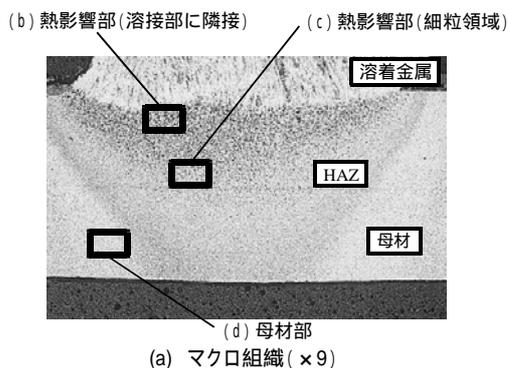


写真 - 7 隔肉溶接を施した試験体の組織画像 (SP32TMD 試験体の一部)

5. まとめ

本研究では、焼却プラント内部に洗浄作業員が入る人通孔を開くための有効な機械的切断方法を実験的に判断するとともに、冶金分析結果から鋼板が受ける温度状況を組織変化の比較等から考察した。

その結果、以下に示すことが明らかとなった。

：鋼板の切断時における切断線上から鋼板周辺へと広範囲に広がる高い温度伝搬を抑えるためには、グラインダーのように摩擦熱が多く発する切断刃よりも、チップソーのように刃先で削りながら切断してゆく切断刃の方が有効である。

：チップソーおよびグラインダーの切断刃に関係なく、鋼板の切断線上の瞬間温度は高温状態になるものの瞬時である。また、この高温に伴う鋼板内部の局所的な組織変化は発生せず、大部分は 200 以下となることから、高温の熱伝達はないものと判断され、ダイオキシン類の気化を低減することが可能であると思われる。なお、送り方式の違いによる温度変化は特に大差はなかった。

：切断刃に水を噴霧する水冷式は、鋼板全体の広範囲へ広がる高い温度伝搬を抑えるのに有効である。なお、回収した水の処理が必要となるが、ウォータジェットで切断した場合に発生する回収水量と比較するとはるかに少ない。

【謝辞】

本研究を遂行するにあたり、(株)日鐵テクノリサーチがずき事業所の榎戸氏、兼松氏ならびに(株)日鐵テクノリサーチ関西事業所の長尾氏、小林氏には多大なる御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) ごみ処理に係るダイオキシン類削減対策検討会編：ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン - ダイオキシン類削減プログラム -、1997.1
- 2) 厚生労働省編：廃棄物焼却施設内作業におけるダイオキシン類暴露防止対策要綱、2001.4
- 3) 酒井伸一：ダイオキシン類のはなし、日刊工業新聞社、1998.7
- 4) 徳山文祐、加藤政利：環境問題を考慮した鋼構造建物の解体技術に関する実験的研究(その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、構造、pp.947~948、2002.8
- 5) 加藤政利、徳山文祐：環境問題を考慮した鋼構造建物の解体技術に関する実験的研究(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、構造、pp.949~950、2002.8
- 6) 加藤政利、中村雄治、松尾 彰、緒方雄二、勝山邦久、橋爪 清：鋼構造建物の発破解体時における鋼板の切断挙動に関する研究、鋼構造論文報告集、Vol.6, No.24, pp.31~38、1999.12
- 7) 溶接学会編：溶接・接合技術、産業出版、1994.7