ガス切断により板に与えられる熱量について

正員 寺崎 俊夫* 北村 貴典*
宮本 昌寛** 藤井 俊英***

Heat Input Generated in Plate by Gas Cutting Process

by Toshio Terasaki, *Member* Takanori Kitamura
Yoshihiro Miyamoto Toshihide Fujii

Summary

Heat input generated in plate by gas cutting process was determined quantitatively. And, the feature of distribution of heat input along the thickness was clarified. First of all, the heat input distribution of the preheating flame was examined. Next, about the gas cutting process, the method of predicting the heat input was proposed, and the predicted values were compared with the experimental values. Finally, the inherent strain distribution along the thickness was measured, and the heat input distribution along the thickness was examined. The main conclusions obtained were as the following:

- 1) It was able to explain the heat input distribution of the preheating flame as gaussian distribution.
- 2) It was shown that the proposed method of presuming the heat input in plate generated by gas cutting was appropriate.
- 3) The distribution of heat input by gas cutting along thickness is effected by preheating gas flame and dross.

1. 緒言

最近の技術進歩により、製造業の熱切断工程においては、比較的薄い板にはレーザー切断やプラズマ切断の適用が広がっている。しかしながら、厚板の切断では、ガス切断が多く用いられている¹⁾。ガス切断に関する研究の歴史は古く、様々な知見^{2,3)}が得られているが、切断機構に関する研究がほとんどであり、切断品の精度に関する研究は少ない。

ガス切断を含む熱エネルギーを利用した熱切断加工において、切断後の変形は被切断材に与えられる熱量に大きく影響されている。つまり、切断加工精度を左右する主要な要因の一つが被切断材に与えられる熱量である。切断により板に与えられる熱量については、松山⁴⁾が熔融効率の逆数である M 値に関する研究成果をまとめている。著者ら⁵⁾は実験によりレーザー切断およびプラズマ切断によって被切断材に与えられる熱量を検討し、熱量予測式を提案した。ガス切断では予熱炎による熱量と酸化反応による熱量の両者が被切断材に与えられるため、切断に伴って板に与えられる熱量を検討する場合、プラズマ切断、レーザー切断と比

較して、複雑である。今までの研究成果の調査を行ったが、ガス切断により板に与えられる熱量を予熱炎による熱量と酸化反応による熱量に分けて検討した例はほとんど見受けられない。

以上のことから、本報では予熱炎による熱量および切断による熱量を実験により検討した。さらに、熱伝導理論式を用いて、予熱炎により板に与えられる熱量の定式化を行った。次に、ガス切断した切断材の板厚内の固有ひずみ分布を求め、固有ひずみと熱量の結びつきの観点から、板厚内での切断入熱分布の特徴を検討した。

2. 実験

2.1 プロパンガス流量と酸素ガス流量の測定方法

本実験で使用したガス切断装置の模式図を Fig.1 に示す。Fig.1 の左と中央の列はそれぞれ予熱炎用の酸素とプロパンガスの流れであり、右の列は切断酸素の流れである。予熱炎用の酸素とプロパンガスのガス流量は Fig.1 に示す流量計を用いて測定した。切断酸素は流量が大きいので、切断火口に流入する直前の切断酸素のガス圧力測定結果からガス流量を求めた。

2.2 予熱炎による入熱量の測定方法と実験結果

予熱炎による入熱量測定に使用した試験片を Fig.2 に示す。試験片は板厚 $h = 32.8\text{mm}$ 、板幅 $2W = 100\text{mm}$ (半幅

* 九州工業大学 大学院 工学研究院

** 九州工業大学 学部学生
(現 広島アルミニウム工業 (株))

*** 日酸 TANAKA (株)

Fig.1 Gas cutting apparatus

$W = 50\text{mm}$), 板長 $L = 200\text{mm}$ の軟鋼板を使用し、加熱両端の不連続をさけるため、タブ板を用いた。中性炎となるように酸素、プロパンガス流量を調整⁶⁾した予熱炎で試験片表面を長手方向に速度 v で直線移動させ、加熱裏面中央および側面中央に K 熱電対をつけ、熱サイクルを測定し、板全体の平均温度上昇 T_{av} ($^{\circ}\text{C}$) を求めた。熱サイクル測定結果の一例として、後述の Table 1 の下から 5 行目に示した条件の予熱炎の熱サイクルを Fig.3 に示す。Fig.3 の実線は加熱裏面中央、破線は側面中央で測定した熱サイクルである。Fig.3 の横軸の時刻零はトーチ中心が板長中央を通過した瞬間とした。ここで、板全体が平均温度に至るまでの時間 t_H は、熱拡散率 k (mm^2/s) を用いると熱伝導理論式より式 (1) で与えられる⁷⁾。

$$t_H = 0.56W^2/k \quad (1)$$

ここで、実験には Fig.2 に示す軟鋼板を用いたので、 $W = 50\text{mm}$ 、 $k = 10\text{mm}^2/\text{s}$ を用いると $t_H = 140\text{s}$ となる。Fig.3 より、平均温度上昇 $T_{av} = 56.5^{\circ}\text{C}$ となることがわかる。

Fig.2 Specimen for measuring heat input by pre heating flame

Fig.3 Thermal cycle by preheating flame

比熱 c ($\text{J/g}\cdot^{\circ}\text{C}$)、密度 ρ (g/mm^3) を用いると予熱炎による単位加熱長当たりの入熱 Q_{net}^{pre} (J/mm) および単位時間当たりの入熱 q_{net}^{pre} (J/s) は次式で T_{av} と結びつけられる。

$$Q_{net}^{pre} = c\rho \cdot h \cdot 2W \cdot T_{av} \quad (2)$$

$$q_{net}^{pre} = c\rho \cdot h \cdot 2W \cdot T_{av} \cdot v \quad (3)$$

Table 1 Experimental results of heat input by preheating flame

v (mm/min)	Tip	F (l/min) O ₂ LPG	T_{av} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{net}^{pre} (J/mm)	q_{net}^{pre} (J/s)
400	#1	5.8 1.0	16.5	200	1331
	#1	5.8 1.0	15.5	188	1251
	#1	9.2 1.7	24.5	297	1977
	#1	9.2 1.7	23.0	278	1856
	#1	8.6 2.6	34.0	412	2743
	#1	8.6 2.6	34.5	418	2784
	#1	13.6 4.9	51.0	617	4115
	#1	13.6 4.9	51.0	617	4115
	#1	13.6 4.9	51.0	617	4111
	#1	19.7 7.0	68.0	823	5487
	#1	19.7 7.0	66.5	805	5366
	#2	11.6 3.9	44.5	539	3591
	#2	11.6 3.9	45.0	545	3631
	#2	11.6 3.9	44.5	539	3591
	#2	14.7 5.3	52.5	635	4236
	#2	14.6 5.3	52.0	629	4196
	#2	14.6 5.3	51.0	617	4115
	#2	19.8 7.0	62.5	756	5043
	#2	19.8 7.0	63.0	763	5083
	#2	19.8 7.0	65.0	787	5245
400	#3	9.6 3.2	39.0	472	3147
	#3	9.6 3.2	38.0	460	3066
	#3	15.6 5.8	56.5	684	4559
	#3	15.6 5.8	55.0	666	4438
	#3	15.6 5.8	56.0	678	4519
	#3	20.5 7.5	68.5	829	5527
	#3	20.5 7.5	66.5	805	5366
	#3	20.5 7.5	66.5	805	5366

v : Traveling speed F : Gas flow rate

T_{ave} : Average temperature rise of plate

Q_{net}^{pre} : Heat input by preheating flame

q_{net}^{pre} : Heat input by preheating flame per unit time

Table 2 Experimental results of heat input by preheating flame

Tip	F (l/min)		v	T_{av}	Q_{net}^{pre}	q_{net}^{pre}
	O ₂	LPG	(mm/min)	(°C)	(J/mm)	(J/s)
#3	15.6	5.8	100	207.0	2505	4176
			100	197.0	2384	3974
			200	124.0	1501	5003
			200	123.0	1489	4962
			200	114.5	1386	4619
			200	112.0	1356	4519
			300	74.0	896	4478
			300	74.0	896	4478
			400	56.5	684	4559
			400	55.0	666	4438
			400	56.0	678	4519
			400	59.3	718	4785
			400	57.3	693	4619
			400	56.0	678	4519
			600	37.5	454	4539
			600	35.5	430	4297
			1200	18.5	224	4478

F : Gas flow rate v : Traveling speed
 T_{av} : Average temperature rise of plate
 Q_{net}^{pre} : Heat input by preheating flame
 q_{net}^{pre} : Heat input by preheating flame per unit time

なお、軟鋼の比熱、密度はそれぞれ $c = 0.473 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ 、 $\rho = 0.0078 \text{ g/mm}^3$ を用いて、上式の熱量を求めた。

トーチ移動速度を 400 mm/min 一定とし、火口番号および酸素、プロパンガス流量を中性炎となる条件で変化させた場合の実験結果を Table 1 に示す。また、火口番号を #3、酸素、プロパンガス流量を一定とし、トーチ移動速度を変えた場合の実験結果を Table 2 に示す。いずれの場合も火口先端から試験片表面までの距離を 10 mm としている。

2.3 予熱炎の熱量分布の測定方法と実験結果

予熱炎の熱量分布を測定するため、板幅 50 mm の鋼板を Fig.4 に示すように切断トーチの移動直線に対して対称に配置し、隙間（切断溝幅と同じ部分なので、今後は記号 B_w を使用）を種々変化させて予熱炎で加熱し、板に与えられる熱量を測定した。2 枚の板の間隔を変えて入熱量を測定した結果を Table 3 に示す。ここで、隙間 B_w を設けた場合の予熱炎の入熱量を $q_{B_w}^{pre}$ 、 $Q_{B_w}^{pre}$ とした。トーチ移動速度、

Fig.4 Specimen for measuring heat input by pre heating flame

Table 3 Experimental results of heat input by preheating flame examined influence of width of cutting groove

v	Tip	F (l/min)		B_w	T_{av}	$Q_{B_w}^{pre}$	$q_{B_w}^{pre}$
(mm/min)		O ₂	LPG	(mm)	(°C)	(J/mm)	(J/s)
300	#3	15.6	5.8	1.0	68.6	831	4156
				1.0	71.5	866	4331
				2.0	61.7	748	3738
				2.0	58.8	712	3559
				2.0	61.0	739	3695
				2.4	59.0	715	3574
				2.4	60.0	727	3635
				3.0	53.1	643	3217
				3.0	56.3	681	3407
				4.0	41.0	497	2484
				4.0	48.8	591	2953
				4.0	46.8	566	2832
				5.0	40.0	485	2423
				5.0	38.0	460	2302
				7.0	25.0	303	1514
				10.0	15.0	182	909

v : Traveling speed F : Gas flow rate
 B_w : Distance between two plates ($\approx$ width of cutting groove)
 T_{av} : Average temperature rise of plate
 $Q_{B_w}^{pre}$: Heat input by preheating flame
 $q_{B_w}^{pre}$: Heat input by preheating flame per unit time

火口番号およびガス流量は一定とし、隙間 B_w を 1.0 mm から 10.0 mm まで変化させて実験を行った。入熱量の測定は 2.2 節と同様に行った。

2.4 切断による入熱量の測定方法と実験結果

ガス切断により与えられる熱量測定用試験片を Fig.5 に示す。板長さ左端部に予熱炎の半分がかかるように 30 秒間予熱した後に切断酸素を所定の流量素早く流し、切断速度 v で左端部から板長さ右端部に向けて切断した。裏面中央から板幅方向に 20 mm 離れた位置と側面中央での熱サイクルを熱電対を用いて測定し、切断後の鋼板の平均温度上昇 T_{av} を測定した。ガス切断時の熱サイクル測定結果の一例として、後述の Table 4 の下から 6 行目に示した切断条件の熱サイクルを Fig.6 に示す。Fig.6 の実線は加熱裏面中央から板幅方向に 20 mm 離れた位置、破線は側面中央で測定した熱サイクルである。Fig.6 の横軸の時刻零はトーチ中心が板長

Fig.5 Specimen for measuring heat input by gas cutting

Fig.6 Thermal cycle by gas cutting

中央を通過した瞬間とした。ここで、切断溝幅を B_W (mm) とすると、切断後の鋼板の板幅は $2W - B_W$ となるから、板全体が平均温度に至るまでの時間 t_H は、式 (1) において、 $W \rightarrow (2W - B_W)/2$ を代入することにより、 $t_H = 133$ s となる。Fig.6 より、平均温度上昇 $T_{av} = 183$ °C となるので、式 (2) において $2W \rightarrow (2W - B_W)$ を代入することにより、ガス切断により被切断材に与えられる全熱量 Q_R が実験値として得られる。板厚および切断速度を変えてガス切断した場合の入熱量測定結果を Table 4 に示す。Table 4 において、9 列目に記述している Quality で Good はドロスのない良質切断を意味し、Bad は切断時にドロスが付着したもので

Table 4 Experimental results of heat input by gas cutting

h (mm)	B_W^{ave} (mm)	v (mm/min)	Q_R (J/mm)	$q_{B_W}^{pre}$ (J/s)	$Q_{B_W}^{pre}$ (J/mm)	Q_R^{cut} (J/mm)	Q_R^{MW} (J/mm)	Quality
11.8	2.3	200	1428	3474	1042	385	468	Bad
11.8	2.3	200	1386	3474	1042	344	468	Bad
11.8	2.4	300	994	3430	686	308	350	Good
11.8	2.4	300	1034	3430	686	348	350	Good
11.8	2.4	400	792	3430	514	277	286	Good
11.8	2.4	400	790	3430	514	276	286	Good
12.2	2.4	400	834	3430	514	320	295	Good
32.9	2.4	300	1774	3430	686	1088	977	Good
32.9	2.4	300	1775	3430	686	1089	977	Good
39.7	2.6	200	2579	3342	1003	1576	1622	Good
39.7	2.8	350	2214	3254	558	1657	1105	Bad
50.3	2.2	300	3010	3519	704	2306	1458	Bad
50.3	2.2	300	3026	3519	704	2322	1458	Bad
76.0	2.0	250	4195	3608	866	3329	2460	Bad
76.0	2.0	250	4058	3608	866	3192	2460	Bad

h : Plate thickness B_W^{ave} : Averaged width of cutting groove

v : Traveling speed Q_R : Total heat input by gas cutting

$q_{B_W}^{pre}$: Heat input by preheating flame per unit time

$Q_{B_W}^{pre}$: Heat input by preheating flame

Q_R^{cut} : Heat input by gas cutting ($= Q_R - Q_{B_W}^{pre}$)

Q_R^{MW} : Heat input by gas cutting calculated by modified Wells equation

ある。4 列目の Q_R は切断により被切断材に与えられる全熱量であり、5、6 行目の $q_{B_W}^{pre}$ 、 $Q_{B_W}^{pre}$ は後述の式 (10) と式 (9) より求めた切断溝幅を考慮した被切断材に与えられる予熱炎の熱量である。7 列目の Q_R^{cut} は Q_R から $Q_{B_W}^{pre}$ を引いた酸化反応熱により被切断材に与えられる入熱量である。8 列目の Q_R^{MW} は切断溝幅および切断速度の情報を元に修正 Wells の入熱量予測式⁵⁾で推定した入熱量である。

3. 予熱炎による熱量と熱量分布

3.1 プロパンガス流量と予熱炎による熱量

Table 1 で示した予熱炎が板に与える熱量をプロパンガス流量で整理したものを Fig.7 に示す。Fig.7 の横軸はプロパンガス流量であり、中性炎となるようにプロパンガス流量の増加とともに酸素流量も増やした。Fig.7 の縦軸は単位時間当たりの入熱 q_{net}^{pre} (J/s) である。Fig.7 に示すように、予熱炎による入熱量は、使用する切断火口番号によらず、プロパンガス流量で決定されることが分かる。

次に、Table 2 に示すようにプロパンガス流量が一定（火口番号 #3）にして、予熱炎が板に与える熱量をトーチ移動速度で整理したものを Fig.8 に示す。Fig.8 の横軸にトーチ移動速度をとり、縦軸に単位時間当たりの入熱 q_{net}^{pre} (J/s) をとっている。Fig.8 に示すように、トーチ移動速度によらず単位時間当たりの入熱 q_{net}^{pre} (J/s) はほぼ一定値を示している。

3.2 予熱炎による熱量分布

予熱炎の熱量分布を半径 a のガウス分布と仮定し、実験値である予熱炎の熱量分布測定結果が説明できるか否か

Fig.7 Effect of gas flow rate of LPG for heat input of preheating flame

Fig.8 Effect of travel speed of cutting tip for heat input by preheating flame

検討した。なお、厳密には、輻射や熱伝達を考慮すべきであるが⁸⁾、実験値の測定では板に残存した熱量を板の平均温度上昇から求めており、輻射や熱伝達の影響を考慮する精度の実験を行っていないため、輻射・熱伝達は無視した。点 $(x, y) = (x', 0)$ を中心に、全熱量 P (J)、ガウス半径 a (mm)のガウス分布熱源が投与されたとき、任意点 (x, y) での単位面積当たりの投与熱量 $p(x, y)$ (J/mm²)は次式で与えられる。

$$p(x, y) = P / (\pi a^2) \cdot \exp[-\{(x - x')^2 + y^2\} / a^2] \quad (4)$$

次に、このガウス分布熱源を、Fig.9に示すように鋼板上を x 軸方向に移動させた場合を考える。移動速度 v (mm/s)、単位時間当たりの全入熱量を $q_{\text{net}}^{\text{pre}}$ (J/s)とする。現在の時刻から τ (s)前に点 $(x', 0)$ を通過したと仮定すると、点 $(x', 0)$ に時間 $d\tau$ (s)間だけ投与された熱量 $q_{\text{net}}^{\text{pre}} \cdot d\tau$ (J)による、任意点 (x, y) での単位面積当たりの熱量 $dp(x, y)$ (J/mm²)は式(4)より $P \rightarrow q_{\text{net}}^{\text{pre}} \cdot d\tau$ (J)、 $x' \rightarrow v\tau$ (mm)を代入した次式で与えられる。

$$dp(x, y) = q_{\text{net}}^{\text{pre}} \cdot d\tau / (\pi a^2) \cdot \exp[-\{(x - v\tau)^2 + y^2\} / a^2] \quad (5)$$

予熱炎が切断開始直後から切断終了までに、任意点 (x, y) に投与する単位面積当たりの入熱量 $p(x, y)$ (J/mm²)は

Fig.9 Moving gaussian heat source on surface

Fig.9に示すガウス熱源が遠方から近づいてきて、遠方へ去るときに与えられる熱量の総和であるから、式(5)で時間 τ を $-\infty$ から $+\infty$ まで積分することにより、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} p(x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} dp(x, y) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} q_{\text{net}}^{\text{pre}} \cdot d\tau / (\pi a^2) \cdot \exp[-\{(x - v\tau)^2 + y^2\} / a^2] \\ &= q_{\text{net}}^{\text{pre}} / (\pi a^2) \cdot \exp(-y^2 / a^2) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{-(x - v\tau)^2 / a^2\} d\tau \\ &= 1 / v \cdot q_{\text{net}}^{\text{pre}} / (a\sqrt{\pi}) \cdot \exp(-y^2 / a^2) \end{aligned} \quad (6)$$

次に、被切断材に投与される x 軸方向単位長さ当たりの投与熱量を考える。任意点 (x, y) における単位 x 軸長当たりの微小面積 $1 \times dy$ (mm²)に投与された熱量は

$$p(x, y) \times 1 \times dy \text{ (J)} \quad (7)$$

となる。

2.3節の実験で隙間(切断溝幅)が B_w (mm)で、切断溝幅は x 軸対称であるから、式(7)を y 軸方向に $B_w / 2 \sim +\infty$ まで積分したものを2倍した熱量が切断溝幅 B_w 以外の部分に投与された x 軸方向単位長さ当たりの熱量 $Q_{B_w}^{\text{pre}}$ (J/mm)となり、次式となる。

$$\begin{aligned} Q_{B_w}^{\text{pre}} &= 2 \times \int_{B_w / 2}^{\infty} p(x, y) dy \\ &= 2 \times \int_{B_w / 2}^{\infty} 1 / v \cdot q_{\text{net}}^{\text{pre}} / (a\sqrt{\pi}) \cdot \exp(-y^2 / a^2) dy \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $u = y / a$ とおくと、上式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} Q_{B_w}^{\text{pre}} &= 2 / v \cdot q_{\text{net}}^{\text{pre}} / (a\sqrt{\pi}) \cdot a \times \int_{B_w / (2a)}^{\infty} \exp(-u^2) du \\ &= 1 / v \cdot q_{\text{net}}^{\text{pre}} \cdot [1 - \text{erf}\{B_w / (2a)\}] \end{aligned} \quad (9)$$

したがって、切断後の(切断溝幅 B_w を除いた)被切断材部分に予熱炎から投与される単位時間当たりの入熱量 $q_{B_w}^{\text{pre}}$ (J/s)は次式で与えられ、

$$q_{B_w}^{\text{pre}} = Q_{B_w}^{\text{pre}} \times v = q_{\text{net}}^{\text{pre}} \cdot [1 - \text{erf}\{B_w / (2a)\}] \quad (10)$$

$q_{B_w}^{\text{pre}}$ を $q_{\text{net}}^{\text{pre}}$ で正規化すると次式となる。

$$q_{B_w}^{\text{pre}} / q_{\text{net}}^{\text{pre}} = 1 - \text{erf}\{B_w / (2a)\} \quad (11)$$

ガウス半径 a は不明である。火口の種類、形状が異なれば、熱量分布も変化することが考えられるが、実験に使用

Fig.10 Relation between heat input by preheating flame and width of cutting groove

した火口番号 #3 の火口先端の半径が約 5mm であることから、 $a = 5\text{mm}$ をベースに実験値が最も説明できるガウス半径をトライアンドエラーで検討した。 $a = 4.5, 5.5, 6.5$ の場合について計算した結果を Fig.10 に破線、実線、一点鎖線で示す。Fig.10 の横軸は切断溝幅に見立てた 2 枚の鋼板の隙間、縦軸は鋼板に投与される熱量を隙間が零の入熱量で割って正規化したものである。Fig.10 の●印は Table 3 に示した実験結果をプロットしたものである。Fig.10 に示すように、 $a = 5.5\text{mm}$ の場合、実験結果とよく一致を示した。よって、本実験で使用した条件の予熱炎の入熱分布は、ガウス半径が 5.5mm のガウス分布で概ね近似できることが分かった。

4. 切断による入熱

4.1 切断入熱（残存熱量）

ガス切断は酸素の酸化反応による発熱反応を利用して、鋼材を溶融し切断する方法であり、被切断材に与えられる熱量は予熱炎と酸化反応熱である。このように、熱源が複数個存在することがガス切断による入熱量の定量化を困難にしている。一方、著者ら⁵⁾はレーザ切断、プラズマ切断といった予熱炎を必要とせず、熱源自体が持つエネルギーを利用して被切断材を溶融し切断を行う場合について、Wells⁹⁾の提案する切断により板に与えられる熱量の予測式の欠点を指摘した修正 Wells の予測式を提案した。この式を用いて、ガス切断により板に与えられる熱量を推定できるか否か検討した。修正 Wells の予測式の詳細については紙面の都合上省略するが、Table 4 の 2 列目に示した実験で得られた切断溝幅の情報と、移動線熱源による温度上昇理論式を用いて、単位切断長当たりの全投与熱量と溶融

Fig.11 Comparison of experimental results of heat input by gas cutting with predicted value

領域内の熱量を計算し、両者の差をとることにより、被切断材に与えられる熱量を推定した。Table 4 に示したガス切断により板に与えられる熱量の実験結果と修正 Wells の予測式から推定した入熱量を比較したものを Fig.11 に示す。Fig.11 の横軸は修正 Wells の予測式から推定した入熱量 Q_R^{MW} であり、縦軸は切断により被切断材に与えられる全熱量 Q_R から予熱炎による切断溝幅を考慮した入熱量 $Q_{B_W}^{pre}$ を引いた熱量 Q_R^{cut} をとっている。この Q_R^{cut} は酸化反応熱による鋼材の溶融に直接関係する熱源による入熱量に相当する。Fig.11 の●印は切断時にドロスの付着がない良質切断のデータ、▲印は切断時にドロスが付着したものである。

Fig.12 Cutting surface

Fig.12(a) に良質切断の場合、Fig.12(b) にドロスが付着した切断の場合の切断写真をそれぞれ示す。Fig.12(b) では、良質切断に対して、切断した板の裏面側に多くドロスが付着している。Fig.11 に示すように、ドロスが付着した切断では、熱量の実験結果が予測値よりも大きくなっている。これは、ドロス付着により、ドロスが持つ熱量およびドロス付着によりドロスが新たに切断火炎によりもらう熱量が考えられる。一方、良質切断の場合、“切断により被切断材に与えられる全熱量から予熱炎による入熱量を引いた熱量”は修正 Wells の熱量予測式⁵⁾で推定できることが分かった。

4.2 板厚方向の熱量分布

ガス切断の場合、Fig.13(a) に示すように予熱炎による入熱 (Fig.13(a)(A)) と酸素噴流と鉄の酸化反応熱による入熱 (Fig.13(a)(B)) および裏面に付着するドロスによる入熱 (Fig.13(a)(C)) の和が被切断材に与えられる入熱量であることを前節までで示した。これにより、ガス切断した場合の板厚方向の入熱量は Fig.13(b) に示す模式図のようになるものと推定される。すなわち、板厚方向上部は予熱炎による入熱と酸化反応熱の和となり、中央部は酸化反応熱のみ、下部は酸化反応熱とドロスによる入熱の和となると考えられる。そこで、板厚 39.7mm の鋼板をガス切断したものについて、板厚方向の上部、中央部、下部での固有ひずみを

測定¹⁰⁾し、ガス切断時の板厚方向の入熱量分布を検討した。Fig.14 に良質切断した場合の固有ひずみ分布測定結果を示す。Fig.14 の横軸は切断面から板幅方向への距離、縦軸に切断線方向成分の固有ひずみをとっている。●印は表面部、▲印は板厚中央部、■印は裏面部の固有ひずみである。Fig.14 に示すように、板厚中央部と裏面部の固有ひずみ発生範囲は概ね一致している。これは良質切断であるため、Fig.13(a)、(b) に示すドロス付着による入熱がほとんど無く、板厚中央部、裏面部ともに酸化反応熱による入熱のみと考えられる。一方、表面部は固有ひずみ発生範囲が大きくなっている。これは表面部では予熱炎による入熱と酸化反応熱の和として熱量が与えられるためである。

Fig.15 に Fig.14 と同じ鋼材を用い、切断速度を良質切断可能な条件より大きくして、ドロスが付着する条件でガス

Fig.15 Inherent strain distribution of gas cutting with dross

切断した場合の固有ひずみ分布測定結果を示す。図の縦軸、横軸および記号は Fig.14 と同様である。Fig.15 に示すように、ドロスが付着した裏面部での固有ひずみ発生範囲が板厚中央部より大きくなり、予熱炎の影響を受ける表面部と同程度の発生範囲となった。Fig.14 および Fig.15 の結果は、Fig.13 に示したガス切断時の板厚方向の熱量分布の考え方を裏付ける結果となった。

以上より、ガス切断により板に与えられる熱量は、予熱炎やドロス付着の影響を受けて、板厚方向に分布しており、切断変形や被切断材の残留応力を評価する際にはこれらについて考慮しなければならないことを示唆している。

5. 結 言

- 1) 予熱炎による入熱量は、使用する切断火口番号によらず、プロパンガス流量で決定される。
- 2) 予熱炎による単位時間当たりの入熱量は、トーチ移動速度によらず、ほぼ一定値を示す。
- 3) 本実験の範囲では、予熱炎の熱量分布は、火口先端半径を基準にしたガウス半径を持ったガウス分布の熱量分布として概ね説明できた。
- 4) 良質切断の場合、切断により被切断材に与えられる全熱量から予熱炎による入熱量を引いた熱量は修正 Wells の熱量予測式で推定できる。
- 5) ガス切断により板に与えられる入熱は予熱炎、ドロス付着の影響を受けて板厚方向に分布する。

参 考 文 献

- 1) 林武彦：熱切断方法の使い分け、社団法人溶接学会平成5年度応接・接合セミナー 高精度加工・接合のための熱切断技術の最近の発展とその展望、(1994)、76-88
- 2) 大西巖、水野政夫：ガス切断およびガス加工、熔接叢書第7巻、熔接ニュース出版局、(1955)
- 3) 中西実、溶接シリーズ編集委員会一監修：<やさしい溶接シリーズ>7 やさしいガス切断、産報 (1971)、56-57
- 4) 松山欽一：熱切断の基礎知識、社団法人溶接学会 平成5年度応接・接合セミナー 高精度加工・接合のための熱切断技術の最近の発展とその展望、(1994)、1-18
- 5) 寺崎俊夫、松山欽一、北村貴典、上木原洋丘：熱切断加工により板に投与される熱に関する実験と予測式、日本機械学会論文集 (C)、66(2000)、326-331
- 6) 田中製作所：切断火口取扱説明書
- 7) 寺崎俊夫、石本憲司：局部予熱施行における熱サイクルの予測式について、溶接学会論文集、9 (1991)、446-451
- 8) 松岡潔、富田康光、大沢直樹、橋本聖史、澤村淳司：熱伝導逆解析による線状加熱時の入熱量の推定法に関する研究、関西造船協会論文集、237(2002)、255-261
- 9) A., A., Wells : Heat Flow in Wellding、Welding Journal、31、(1952)、263s-267s
- 10) 福田敬二、金裕哲、秋山哲也、寺崎俊夫：固有ひずみの概念による溶射材に生じる残留応力の推定方法について、溶射、27、3、(1990)、124-131