

# 鋼材等金属材料の高品質熱切断技術の開発

(昭和62年度加速的技術開発支援事業成果報告)

(総括) 機械部 横山 栄一  
(高品質熱切断技術の開発)

金属科 清高 稔勝  
池松 克也

(熱切断システムの開発)

電子科 小田原 幸生  
藤井 謙二郎

(株)上組大分支店 合原 克英

## 1. はじめに

造船、建築、化学プラント等の鋼構造物の建造では、板材の切り出しには、ガス切断やプラズマ切断が使われる。ところが、ネスティング・システム等のように一枚の板材から複数の部材を連続的に熱切断する場合には、切り出される材料による溶融熱の蓄積により徐々に加熱されて300°Cから500°C程度まで昇温することがあり、これらの材料において反り等の歪の発生や形状精度の悪化、切断部の変質等の悪影響を生じる。これを防ぐために現状では被切断材料に水を掛けるなどしているが、設備が大きくなるなどコスト高になっている。

そこで今回、高張力鋼及びステンレス鋼について常温域及び高温域で切断実験を行い、熱影響等について調査し、さらにエアー・プラズマによる熱切断機において放射温度センサにより切断材の温度を検出しながら切断速度をコンピュータ制御する熱切断制御システムの試作を行った。

なお、本研究は国庫委託事業(中小企業事業団1/2、県1/2)である佐伯・臼杵地域加速的技術開発支援事業の共通基盤的技術開発として実施された。

## 2. 高品質熱切断技術の開発

### 2.1 実験方法

切断用電源は、定格出力電流70Aのエアープラズマ切断機を用い、有効倣い範囲1000mm×1000mmのトレーサーにプラズマ切断トーチを固定して自動

切断法で行った。被切断材は、実験に使用するプラズマ切断機において、切断速度等の切断条件の広い12mm板厚の高張力鋼(SM50A)とステンレス鋼(SUS304)を主に使用し、補助的に16mmの高張力鋼とステンレス鋼を用いた。又被切断材の100°C及び300°Cでの切断は、常温～600°Cの任意設定可能な恒温炉で昇温保持した。表1に実験に用いた被切断材の化学成分を示す。

### 2.2 結果

#### (1) 切断速度の影響

##### イ) 高張力鋼

板厚12mmについて、切断電流70Aにて被切断材の温度差による切断速度の切断幅及びドロス付着量に与える影響を図1と図2に、ドロス付着状態を写真1に示す。又板厚16mmにおける常温での切断速度の影響を図3と図4に示す。本結果に示される如く切断幅及びドロス付着量は、切断速度に大きく影響を受けているが、切断速度が増してくると、切断材の温度差の影響がみられる。又ドロス付着量については、切断速度80cm/min極小値をしめしている。この事は写真1からも明かである。次に16mmの場合もやはり常温での傾向は、12mm板厚と同じである。

##### ロ) ステンレス鋼

板厚12mmについて、切断電流70Aにおける被切断材の温度差による切断速度の切断幅に与える影響を図5、ドロス付着状態を写真2に示す。高張力鋼

表1 被切断材の化学成分

材 料	化 学 成 分 wt (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
SM50A (板厚12mm)	0.20	0.25	1.29	0.018	0.022	—	—
SM50A (板厚16mm)	0.17	0.20	1.30	0.023	0.019	—	—
SUS304 (板厚12mm)	0.07	0.59	0.79	0.027	0.019	18.3	8.9
SUS304 (板厚16mm)	0.07	0.60	0.80	0.028	0.016	18.2	9.0

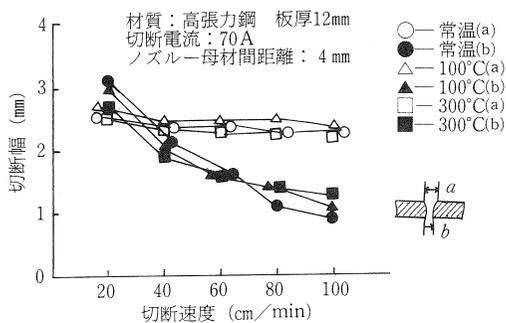


図1 切断速度と切断幅の関係

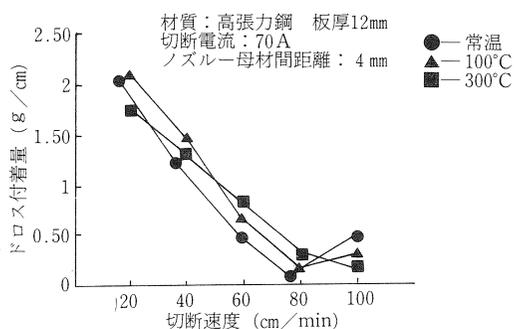


図2 切断速度とドロス付着量の関係

被切断材の温度			切断速度 (cm/min)
常 温	100°C	300°C	
			20
			40
			60
			80
			100

材質：高張力鋼 12mm，切断電流：70 A，ノズルー母材間距離：4 mm

写真1 各種温度における切断速度とドロス付着状態

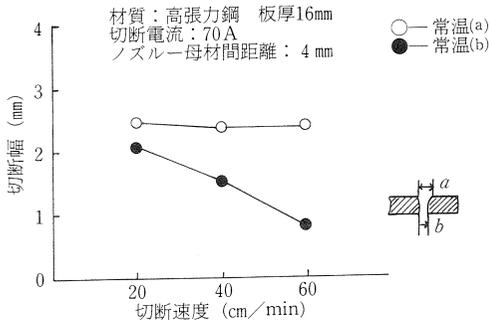


図3 切断速度と切断幅の関係

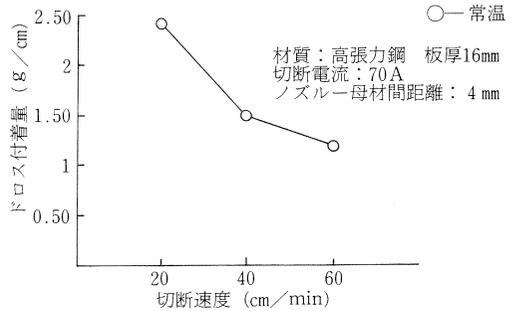


図4 切断速度とドロソ付着量の関係

被切断材の温度		切断速度 (cm/min)
常温	300°C	
		20
		40
		60
		80

材質：ステンレス鋼 12mm, 切断電流：70 A, ノズルー母材間距離：4 mm

写真2 各種温度における切断速度とドロソ付着状態

と同様に切断幅は、切断速度の増加に従って母材裏面側で減少しており、全体的に常温で切断幅が狭くなっているのが認められる。又写真2に示すようにステンレス鋼の場合ドロソは少なく、解離性が大変悪いのでドロソ付着量の定量的把握は困難である。

(2) ノズルー母材間距離の影響

イ) 高張力鋼

板厚12mm について、切断電流70A にて被切断材の温度差によるノズルー母材間距離の切断幅及びドロソ付着量に与える影響を図6と図7に又板厚16mm における常温でのノズルー母材間距離の影響を図8と図9に示す。ノズルー母材間距離を増すことによって切断幅、ドロソ付着量共に増加が認められ

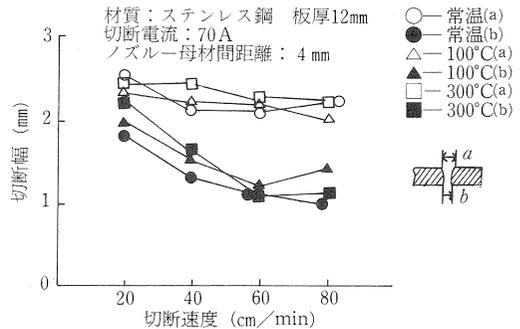


図5 切断速度と切断幅の関係

るが、実験に用いた切断速度ではノズルー母材間距離の因子の方が温度差よりも大きく影響を及ぼして

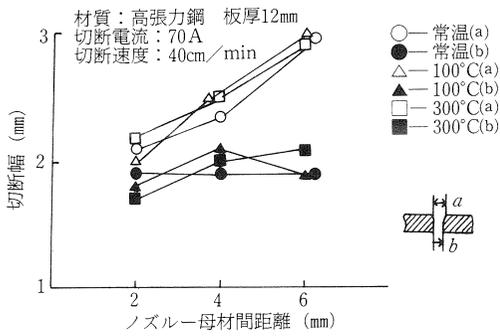


図6 ノズルー母材間距離と切断幅の関係

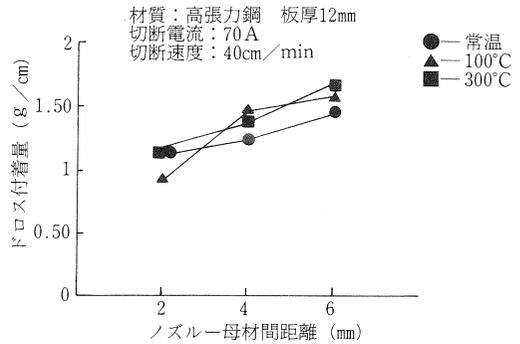


図7 ノズルー母材間距離とドロス付着量の関係

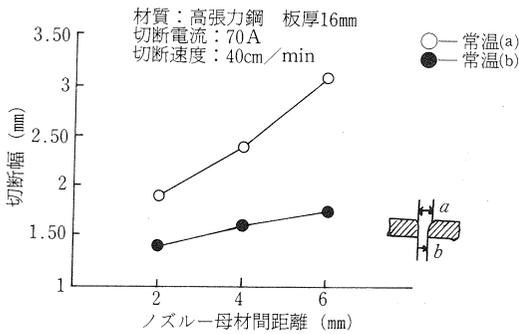


図8 ノズルー母材間距離と切断幅の関係

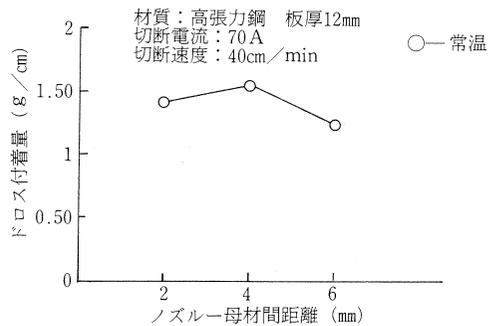


図9 ノズルー母材間距離とドロス付着量の関係

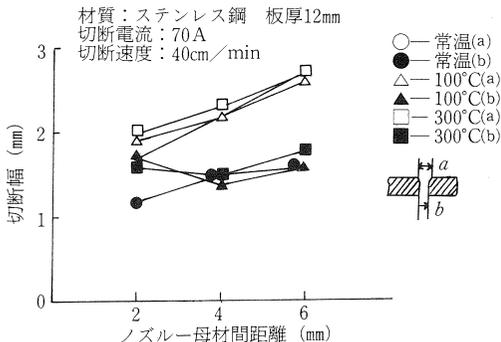


図10 ノズルー母材間距離と切断幅の関係

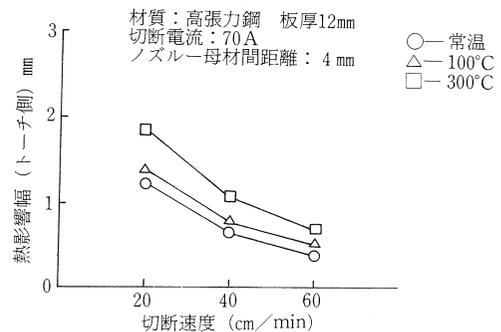


図11 マクロ腐食による切断速度と腐食幅の関係

いる。16mm 板厚についても常温での傾向は、12mm 板厚と同じである。

ロ) ステンレス鋼

板厚12mm について、切断電流70A にて、被切断材の温度差によるノズルー母材間距離の切断面に与える影響を図10に示す。高張力鋼と同様の傾向にある。

(3) 切断面断面のマクロ腐食による熱影響幅

常温、100°C、300°Cに昇温保持した高張力鋼の被切断材を同一切断条件で切断した切断部断面をマク

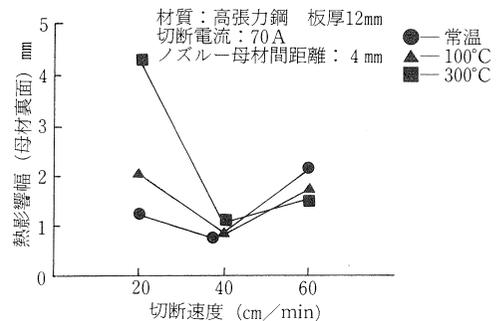
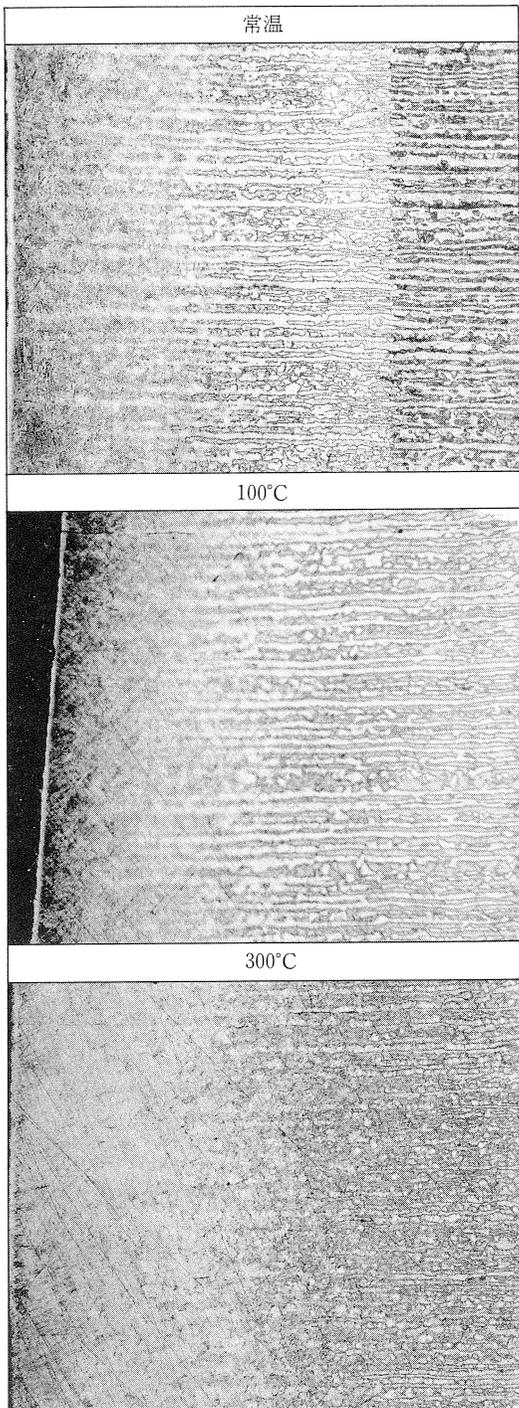
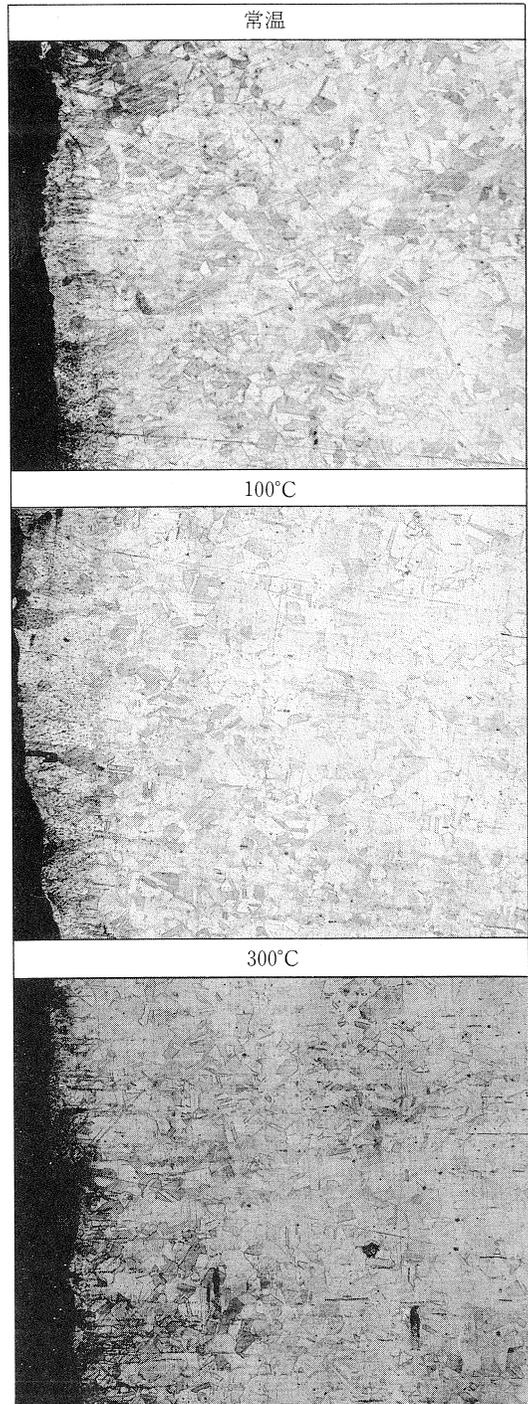


図12 マクロ腐食による切断速度と腐食幅の関係



材料：高張力鋼12mm，切断電流：70A，  
ノズル-母材間距離：4mm，  
切断速度：60cm/min

写真3 各種温度における切断面組織 (×100)



材料：ステンレス鋼12mm，切断電流：70A，  
ノズル-母材間距離：4mm，  
切断速度：40cm/min

写真4 各種温度における切断面組織 (×100)

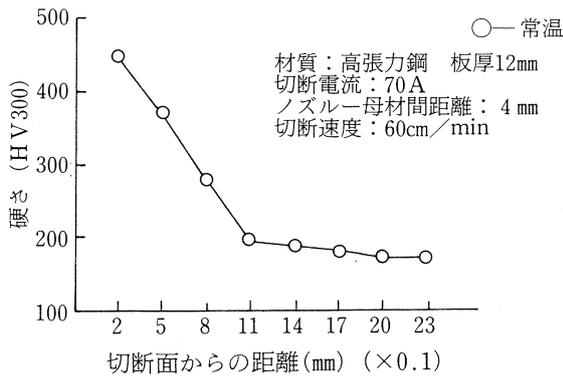


図13 切断面からの硬さ分布

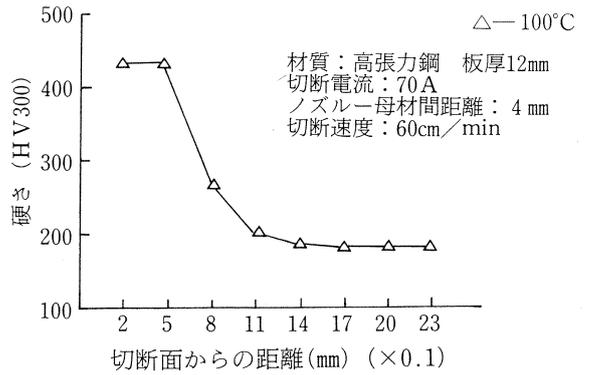


図14 切断面からの硬さ分布

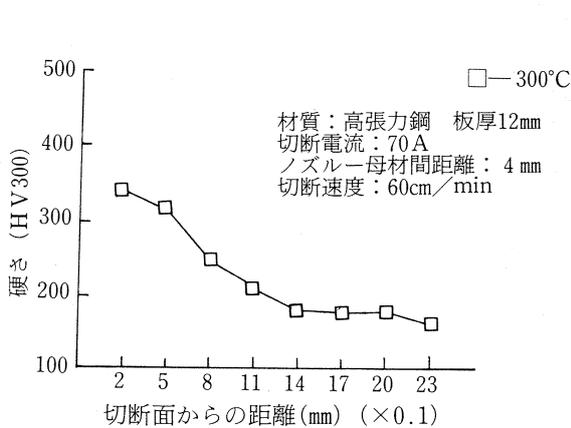


図15 切断面からの硬さ分布

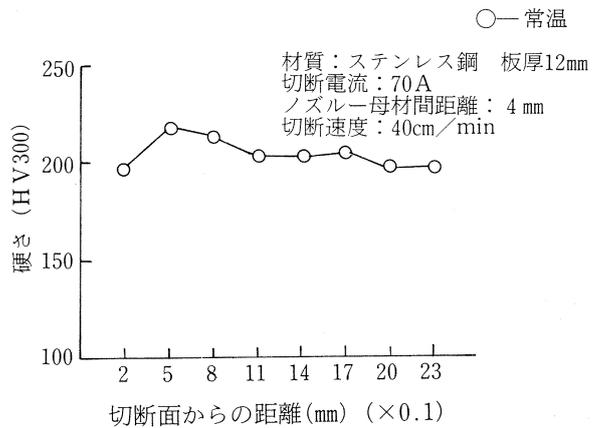


図16 切断面からの硬さ分布

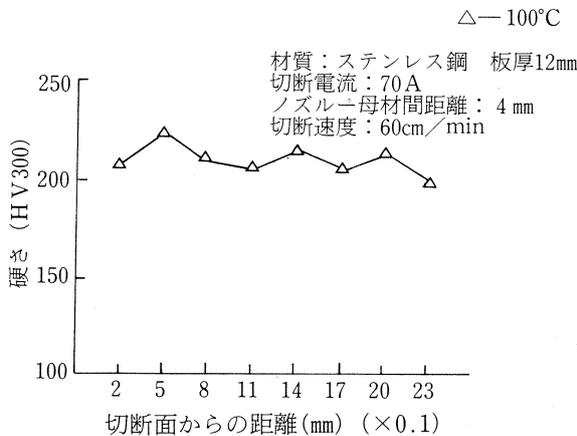


図17 切断面からの硬さ分布

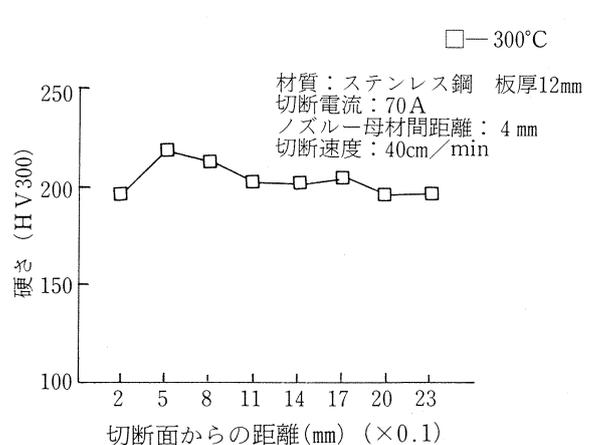


図18 切断面からの硬さ分布

口腐食したものについて熱影響幅を測定したものを図11と図12に示す。この結果から示す如く、切断速度が遅い程切断部断面の熱影響幅が大きくなっている。この事は同一切断条件で入熱が同じでも被切断材の温度差による保有熱量が異なる為生じたものと説明される。

(4) 切断部断面の組織写真及び切断部断面からの硬さ分布

写真3と4又図13~18は、高張力鋼及びステンレ

ス鋼の各々について常温、100°C、300°Cに昇温保持したものを同一切断条件で切断した場合の切断部断面組織写真及び切断部断面からの硬さ分布をしめす。

イ) 高張力鋼

被切断材の温度差に関係なく、切断部表面に数μmの変質層が認められる。又被切断材の温度が高くなるに従って熱影響幅が大きくなっている。硬さについては被切断材の温度が高い300°Cでは最大硬

度が常温及び100°Cに比べて低くなっているが、硬化層は、温度差に関係なくほぼ一定である。

ロ) ステンレス鋼

切断部ごく近傍に変質部が認められるが、熱影響部がみとめられない。又硬度についても変化は認められない。

(5) 実験のまとめ

イ) 切断速度の増加によって、切断幅特に母材裏面側が減少する、又ドロス付着量についても同様に切断速度の増加に従って減少し、ある切断速度で極小値を示す。

ロ) ノズル母材間距離の増加に従って、切断幅特に母材トーチ側が増加する。又ドロス付着量についても、ノズル母材間距離が増すと増加する。

ハ) ステンレス鋼の切断は、ドロスの解離性等の問題から動作ガスの選択が必要である。

ニ) 高張力鋼については、予熱管理と速度制御によって切断部品質の優れた切断が可能である。

ホ) 適性な切断速度を選ぶことによって、切断時の被切断材の温度上昇によって生じる熱影響等の切断部品質に与える悪影響を低減することが可能である。

3. 熱切断制御システムの開発

前項の実験結果を基に、エアー・プラズマ切断機において切断中の材料の温度をセンシングしつつ、切断速度を制御するシステムを試作し、試験を行った。

3.1 切断材料の温度検出方法の検討

熱切断制御システムにおいては切断速度を制御するために切断中の材料の温度を切断用トーチと共に移動しながらセンシングしなければならない。そこ

で、取り扱いの面から非接触検出の方が便利であるので、センサに放射温度センサを採用することにした。また、センサをシステムに用いるにあたって次の点を考慮した。

(使用した放射温度計の仕様を表2に示す。)

1) エアー・プラズマ切断機のアーク光による影響

使用した放射温度センサは最高1000°Cまでの中低温域を検出するもので、測定対象から出される放射エネルギーをセンサ前面に置いたシリコン・フィルタ(8~13 $\mu$ mの範囲の遠赤外線を透過)を通して受光するが、エアー・プラズマ切断機の出すアーク光は波長が短いために影響は無く、実際に使用して正しく測定できた。

2) エアー・プラズマ切断機の発生するノイズの影響

プラズマ切断機は切断開始時にトーチのノズルから発生する数千Vの高周波パルス電圧によるパイロット・アークを発生し、これがノイズとなり、アーク停止時にもノイズを発生する。切断中のアークが安定している状態ではノイズは発生しない。このためにシステムの信号ケーブルや電源ケーブルがアンテナとなってノイズを拾い、システムを誤動作させたりハードウェアに悪影響を与える。このノイズのレベルは高く、対策のためにかなりの時間を割かなければならなかった。

3) 放射率補正の問題

放射温度センサを使用する際には、測定対象物の表面の状態による放射率補正( $\epsilon = 0 \sim 1.0$ )を行う。同じ材料でも表面の状態によって放射率 $\epsilon$ はかなり異なり、一般のステンレス鋼の場合には小さい場合は0.1以下であり、今回使用した放射温度センサでは性能上測定不能である。今回、対象とする材料は主として鋼構造物用材料であり、機械による表面加

表2 温度検出器(放射温度センサ)の仕様

1) 型式・メーカー名	放射温度センサ・ユニット IR-AHOT (株式会社チノー製)
2) 測定温度範囲	-50°C~1000°C (応答時間=1秒) (検出素子:サーモパイル, 測定波長: 8~13 $\mu$ m)
3) 光学系	カセグレン可動焦点方式
4) 放射率補正	$\epsilon = 1.00 \sim 0.10$ (0.01ステップ)
5) 信号出力	デジタル伝送インターフェース (RS-232C) アナログ出力 (0~1.0V)

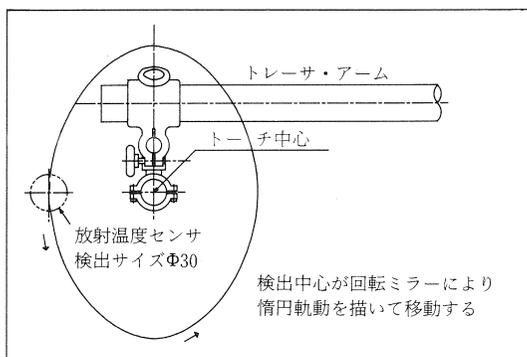


図19 回転検出方式における検出箇所

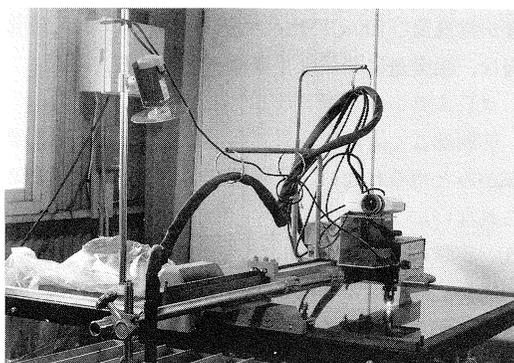


写真5 回転検出方式におけるミラーの取付

工を行っていない圧延したままの材料が多く、ステンレス鋼板の場合は灰色で光沢が無く ( $0.15 < \epsilon < 0.25$ )、鋼板の場合も酸化して黒くなっていることが多く ( $\epsilon > 0.8$ )、放射温度センサによる検出は可能である。

#### 4) センシング方法の検討

熱切断制御システムにおける温度計測の目的は、鋼材の切断箇所における予熱状態をパラメータとして切断速度を制御し、切断の際に加える熱エネルギーを調整することにある。温度検出の箇所として、切断箇所の直前はセンサの焦点をセットすることが難しく、また、離れすぎていても意味が無いので、切断箇所の近くで、切断の際に加熱による温度上昇の影響をある程度受ける箇所を選んだ。

また、検出箇所をトーチ位置に対して固定した場合は切断方向が変わった時に同じ条件で検出することができなくなる。そこで、反射鏡(ミラー)を用い、ミラーをモータの回転軸に対して約6度傾けて取り付け、検出の光路を回転させ、センサの検出中心を回転させてトーチ周辺の温度をドーナツ状に検出する工夫をした。(図19、写真5参照)

ミラーはアルミ板を鏡面仕上げし(反射率  $r = 0.85 \sim 0.95$ )、視野欠けを生じないようにセンサの検出サイズに比べて大きな径(Φ120)のものを使用した。

この方法において、問題点は検出箇所の一部がトーチを固定する金具やアーム、電源ケーブルの影になり、検出結果のS/N比が劣化することである。しかし、トーチの固定方法や電源ケーブル等の引き回しを改善し、この影響を小さくすることは可能で

あり、このままで試験を行った。また、この問題やミラーの反射率に起因する放射温度センサの検出エネルギーの低下は本体の放射率設定で一定の補正係数を乗じ、小さめに設定することによって解決した。

一方、センサをエアール・プラズマ切断機のトーチから離して設置することが出来、ノイズや粉塵に対する耐環境性が向上し、安定したセンシングが可能になった。

#### 3.2 放射温度センサによる温度測定の実際

システムにおいて温度検出方式を確立するためにSS材(軟鋼)及びステンレス鋼について温度測定の実験を行った。なお、鋼材の加熱は電気コンロにより、基準温度の測定は携帯用表面温度計(2455横河北辰電機製)を用いた。

図20-1(SS材-黒皮付き)と図20-2(ステンレス鋼)は通常の方法で測定した結果である。これによると、ステンレス鋼の場合も放射率補正を  $\epsilon = 0.19$  とすれば、 $100^{\circ}\text{C}$ 以下ではやや誤差があるが温度の検出は十分可能である。

図21-1、図21-2は台所用のアルミ箔を貼り付けた反射鏡により反射光を検出したものである。アルミ箔を用いた理由は、アルミニウムが赤外域での反射率に優れているためである。直接測定した場合に比べて測定精度が落ちており、放射率の補正値を小さくしなければならなかった。

アルミ箔では表面の粗さのため反射光が散乱して効率が悪いので、アルミ板を特殊コンパウンドにより研磨・ラッピング仕上げをし、高反射率反射鏡を製作した。図22-1、図22-2はこれを用いて測定を行った結果である。この際に、高反射率ミラーに

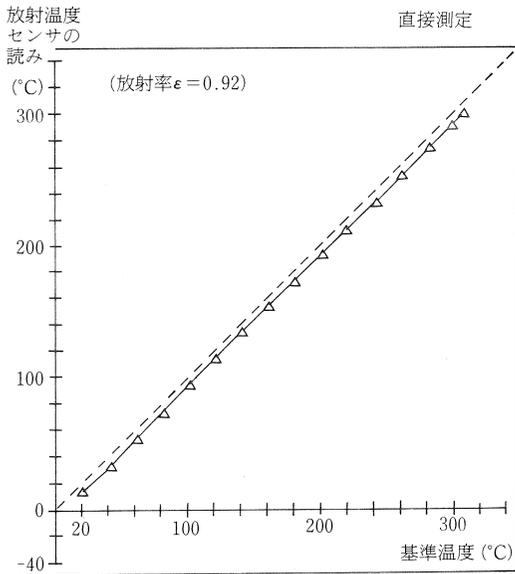


図20-1 S S材 (黒皮付き)

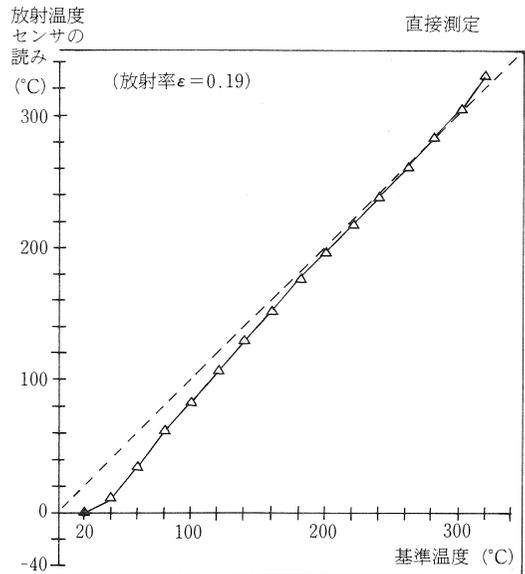


図20-2 ステンレス鋼 (SUS材)

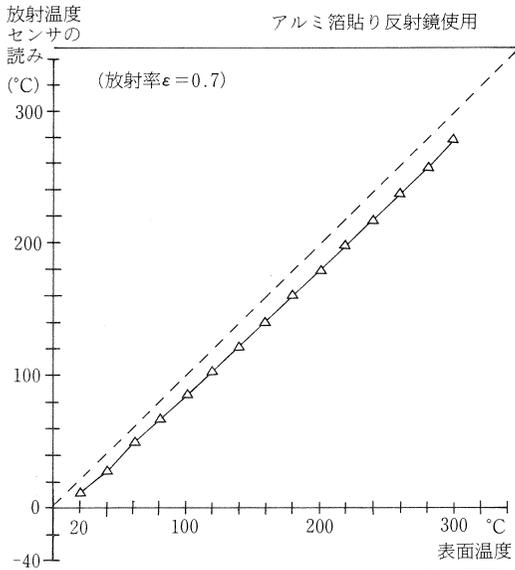


図21-1 S S材 (黒皮付き)

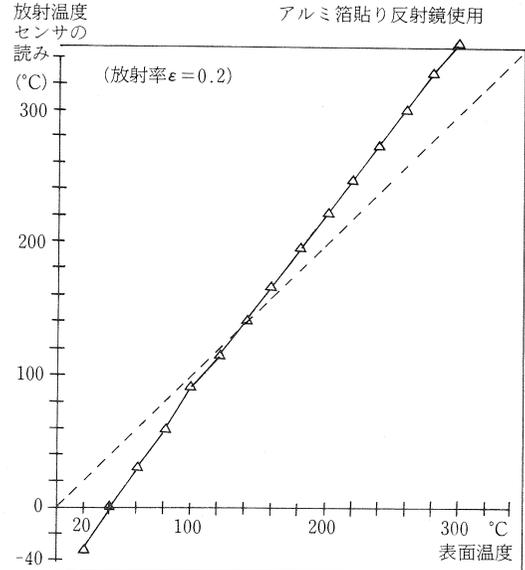


図21-2 ステンレス鋼 (SUS材)

よる回転検出方式を用いている。これによると、アルミ箔を用いた場合と比べ、精度良く測定できている。また、反射鏡の反射率は約90%と推定され、実用上十分であることが分かった。

図23-1, 図23-2は放射率の補正值による検出結果の違いを調べたグラフで、高反射率ミラーによ

る回転検出方式によっている。両者共200°Cで約20度程度の誤差の範囲に入っている。

以上の結果を参考にして、高反射率ミラーによる回転検出方式を製作する熱切断システムにおいて採用することにした。

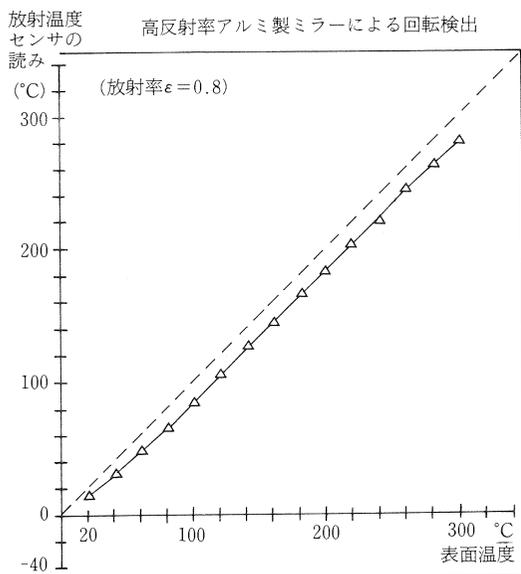


図22-1 S S材 (黒皮付き)

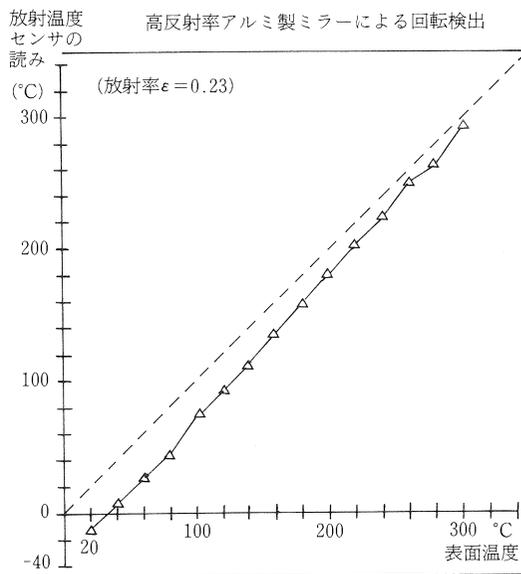


図22-2 ステンレス鋼 (S U S材)

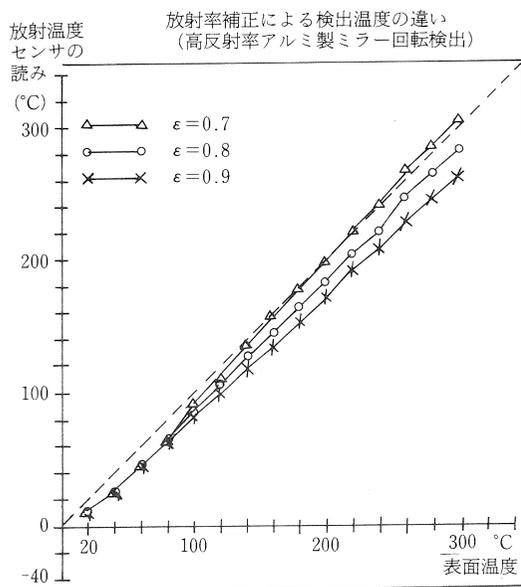


図23-1 S S材 (黒皮付き)

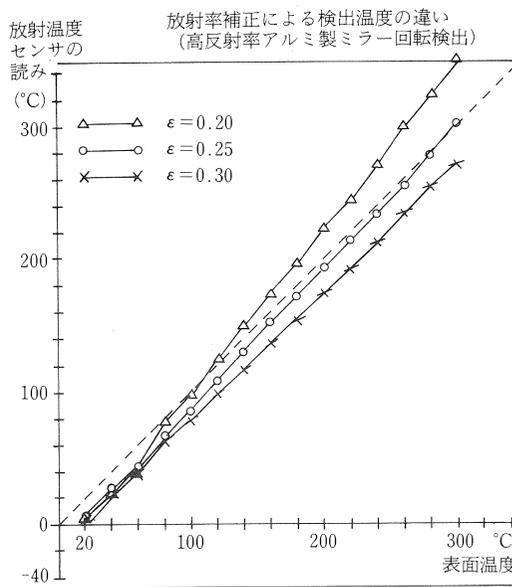


図23-2 ステンレス鋼 (S U S材)

### 3.3 試作機の全体概要

試作した熱切断システムはプラズマ切断機及びトレーサをベースに(仕様を表3に示す), 切断材料の温度検出のために放射温度センサを用い, 切断条件の設定等はパソコンによっている。パソコンとトレーサ, 放射温度センサとの回路接続はインターフェ

ース用マイコンを開発し, それを介して制御を行っている。

試作したシステムはテスト機としての性格が強いので, ホスト・コンピュータはモニター機能が豊富で, プリンタやディスク装置が使用できる汎用のパソコンを使用した。パソコンのプログラムはベイシ

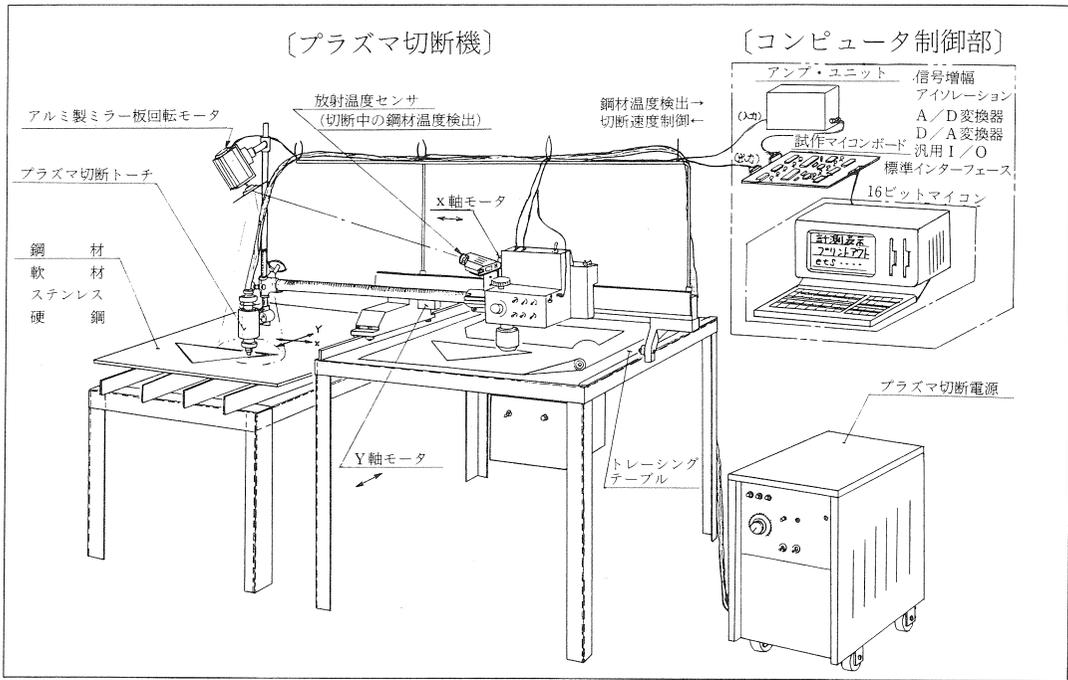


図24 熱切断制御システム全体構成

ック言語を使用し、インターフェース用マイコンに制御コマンドを与え、間接的にトレーサの制御を行い、また、放射温度センサの検出結果の表示なども行っている。

全体構成を図24に、全体図を図25に、全体写真及び各部写真を写真6～写真9に示す。また、システム・フローチャートを図26に示す。

### 3.3 計測・制御インターフェース回路についての説明

#### 1) ハードウェア

インターフェース用マイコンは、回路をコンパクトにするためにシングルチップ・マイクロプロセッサ(8749)をCPUとし、プログラムの実行やモニタ機能を持つホスト・コンピュータであるパソコンとシリアル・インターフェース (RS-232C) を介して

表3 エアー・プラズマ切断機、トレーサの仕様

○ プラズマ切断機	
1) 型式・メーカー名	A-70 (株式会社ダイヘン製)
2) 最大切断厚さ	35mm (鉄, ステンレス鋼)
3) 使用ガス	エアー
4) 最大定格電流	70A
○ トレーサ	
1) 型式・メーカー名	KT-510GXP1010 プラズマ切断キャリッジ (株式会社 田中製作所 製)
2) トレーサ・パターン	ライトレース方式 (線巾: 0.8~1.2mm)
3) 有効倣い範囲	1,000mm×1,000mm
4) 倣い速度	200~2,500mm/min
5) 倣い精度	±0.5mm

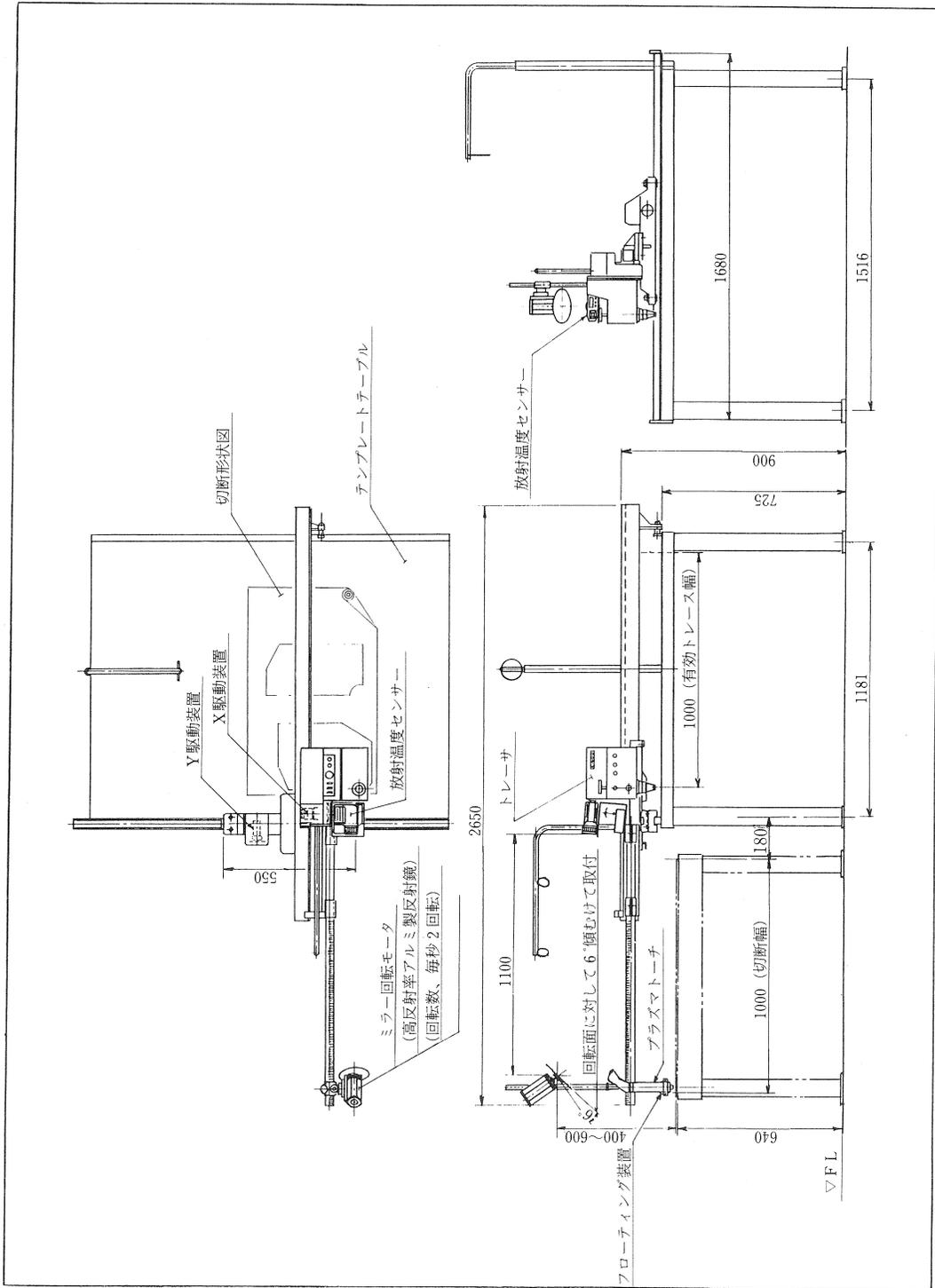


図25 エアー・プラズマ切断機、トレーサ寸法図面

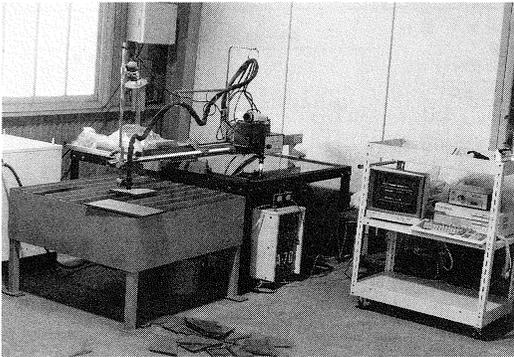


写真6 熱切断制御システム全体写真

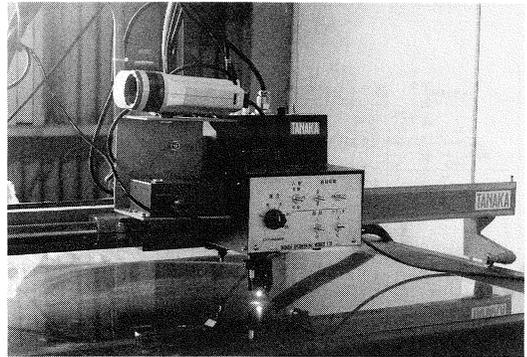


写真7 放射温度センサ、トレーサ操作パネル

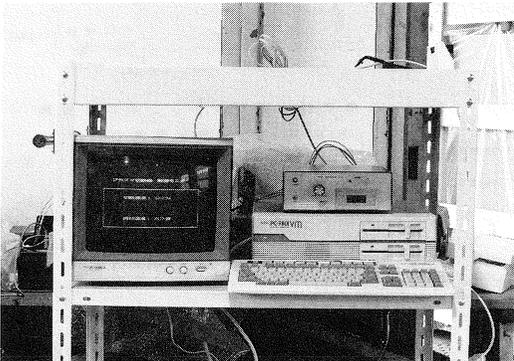


写真8 ホスト・コンピュータ

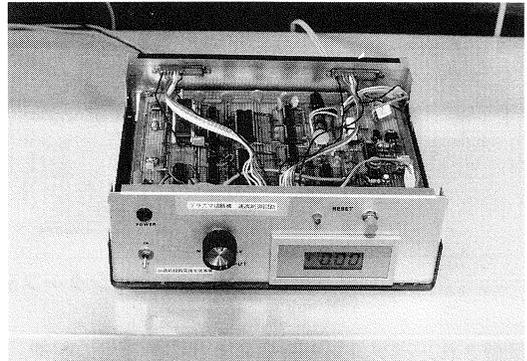


写真9 インターフェース用マイコン

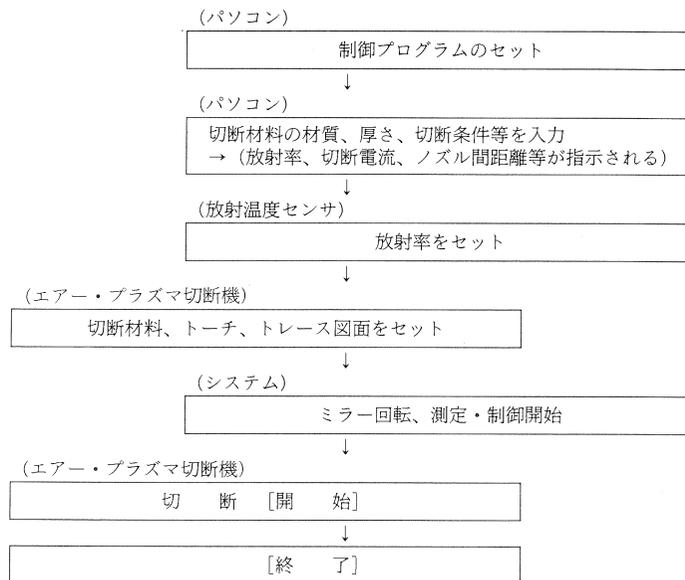


図26 熱切断制御システム・フローチャート

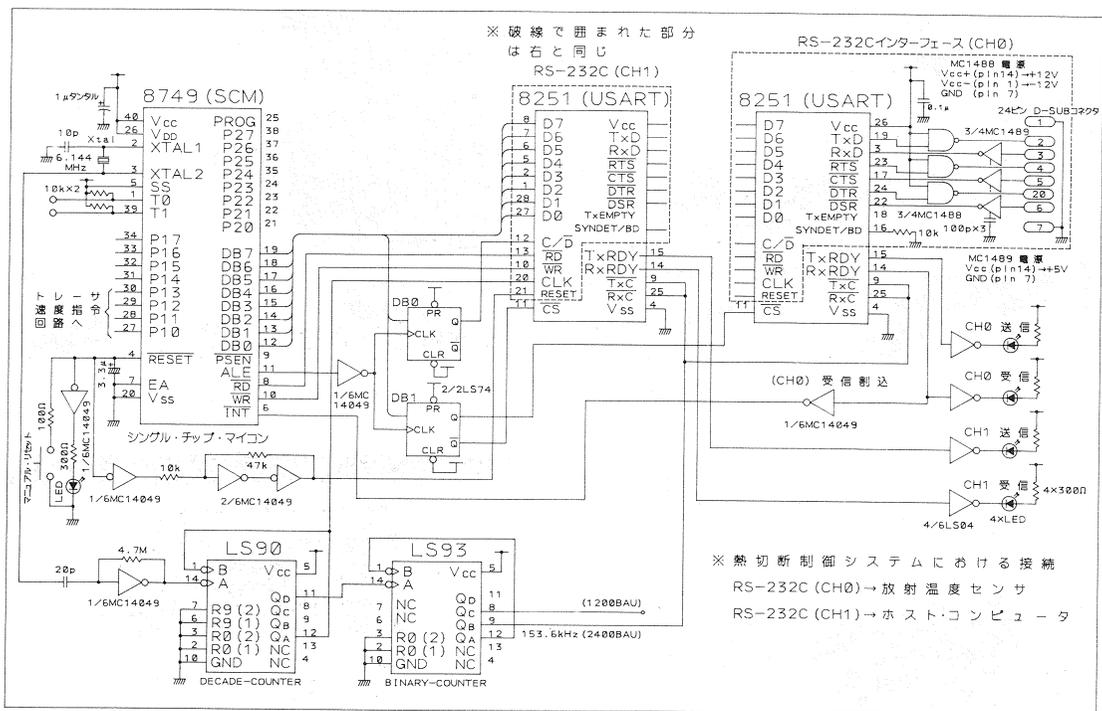


図27-1 インターフェイス用マイコン回路図(1)

接続され、パソコンの指令により切断速度の制御、放射温度センサに対する測定データ等の入出力などを行っている。

(回路図を図27-1、図27-2に、プラズマ切断機トレーサ制御回路との接続を図28に、これに関連してトレーサ検出器の機械図面(取り扱い説明書より抜粋)を図29に示す。)

## 2) プログラム

インターフェイス用マイコンはスレーブ・コンピュータとしてシリアル・インターフェイスを介してパソコン及び放射温度センサと通信を行い、制御コマンド及び測定データ等の入出力、ワンチップ・マイクロプロセッサの持つI/Oポートを利用してプラズマ切断機トレーサへの速度指令信号の出力を行っている。

ここで、今回使用した放射温度センサの特徴で、自動測定モードの場合に毎回測定毎に測定データを送って来る。(最大で毎秒5回)また、これらのデータの中には温度データだけでなく、放射率その他のデータも含まれている可能性もあり、インターフェイス用マイクロコンピュータ側で放射温度センサか

ら送られて来たデータの種類(測定温度、放射率、時定数等)の選別や回数の計数を行い、制御用コンピュータからの指令により、直ぐに制御用コンピュータに転送できるようにバッファとしての働きをしている。

シリアル・インターフェイスで、パソコン側(CH1)はポーリング処理によってプログラマブル・コミュニケーション・インターフェイス(8251)の通信制御を行い、放射温度センサ側(CH0)は割り込み処理によっているが、両者共にハンド・シェイク処理は行っていないので、8251内のデータが後から来たデータによって消されないようにCH0側の処理ルーチンの処理時間はワン・キャラクタ分の転送時間より短くしている。

## 3) ノイズ対策

プラズマ切断機は切断開始時に数千Vのバロット・アークを発生し、切断時は最大70Aの切断電流を流すために、強力な高周波ノイズを発生し、電気的な環境が非常に悪いため徹底したノイズ対策が必要であるが、システムの信号ケーブルや電源ラインにノイズ・フィルタ、フェライト・ビーズ、電磁



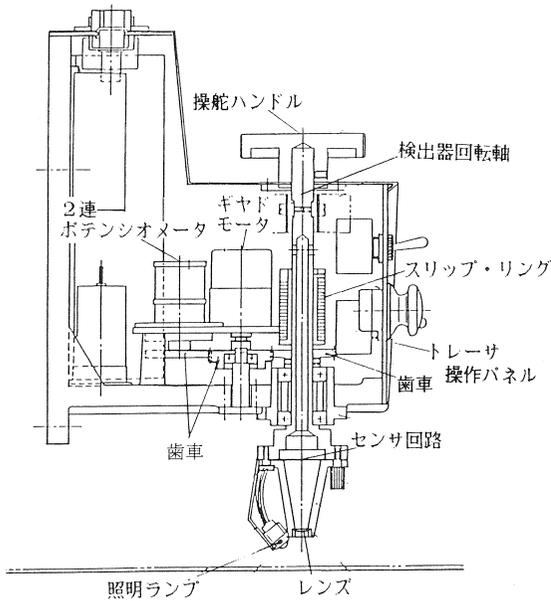


図29 アイ・トレーサ機械図面

- ② 放射温度センサによる温度検出の実験，切断材料の温度センシングのためのアルミ製回転ミラーによる放射温度検出機構の製作，放射温度センサ・パソコン・プラズマ切断機トレーサの間で情報伝達を行うワンチップ・マイコンによるインターフェイス回路の製作等により熱切断制御の基本システムが完成し，実証試験を行った。最初のうちは，エアー・プラズマ切断機の発生するノイズのために計測不能になったり，システムが誤動作していたが，後でノイズ対策として考えられることは全て行い，計画していたレベルまで完成させることが出来た。

〔課題〕

- ① 構造用一般鋼，高張力鋼，ステンレス鋼等汎用鋼材の広範囲な熱切断データを収集し，切断部材の使用目的による切断条件を決定し，データベースの多様化を図る。
- ② 切断部材の品質及び精度の高度化のために，温度センシング・切断速度制御系にさらにノズル・母材間距離系を付加し，システムの高度化を行う。
- ③ 熱切断制御システムのガス・フレーム切断への応用を図る。

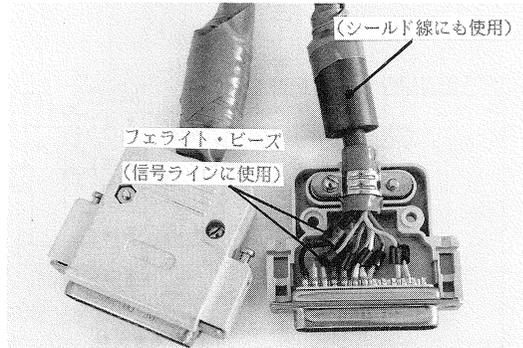
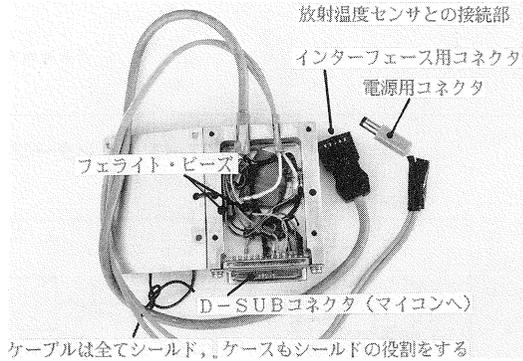


写真10 フェライト・ビーズの使用



ケーブルは全てシールド，ケースもシールドの役割をする

写真11 放射温度センサの信号ライン，電源ラインのノイズ対策



写真12 インターフェイス用マイコンのノイズ対策

5. おわりに

本研究は昭和62年度加速的技術開発支援事業の一環として実施されたが，本文の「まとめ」で述べた様に幾つかの課題が残され，今後も引き続き研究を

実施していきたい。

また、研究の成果である熱切断における熱影響の調査、温度計測技術、ノイズ等の悪環境下における

計測・制御などについては日常の研究・技術指導業務の中で活用したいと思う。