

社団法人

# 日本造船研究協会報告

## 第 12 号

昭和 31 年 10 月

わが国の造船工作中に適した熔接技術確立の研究

..... 第 5 研究部会

Investigations on the Establishment of Welding Techniques  
suitable for the Japanese Shipbuilding Practice

..... The 5 th Research Committee

The Report  
of the  
Shipbuilding Research Association  
of Japan,  
Tokyo, JAPAN  
No. 12  
October 1956

社団法人日本造船研究協会



### 第5研究部会委員名簿

委員長	木原 博		
幹事	増淵 興一		
委員	浅沼 弘	安藤 良夫	岩井 次郎
	大谷 碧	蒲田 利喜蔵	川勝 義雄
	笹山 徳太郎	関口 春次郎	土井 正三
	藤井 義六	藤野 淳	松山 泰
	守屋 公平	山内 俊平	吉識 雅夫
	吉田 俊夫	吉田 兎四郎	渡辺 正紀

### Membership of the 5th Research Committee

Chairman	Hiroshi KIHARA		
Secretary	Koichi MASUBUCHI		
Members	Hiroshi ASANUMA	Yoshio ANDO	Jiro IWAI
	Midori OTANI	Rikizo KAMATA	Yoshio KAWAKATSU
	Tokutaro SASAYAMA	Harujiro SEKIGUCHI	Shozo DOI
	Giroku FUJII	Jun FUJINO	Yasushi MATSUYAMA
	Kohei MORIYA	Shunpei YAMANOUCHI	Masao YOSHIKI
	Toshio YOSHIDA	Toshiro YOSHIDA	Masanori WATANABE

# わが国の造船工作に適した熔接技術確立の研究

## 目 次

緒 言	(1)
I 船体熔接における残留応力及び歪の軽減に関する研究	
I-1 各造船所における船体熔接工作法の調査	(1)
I-2 拘束接手における残留応力に関する研究	(3)
I-3 熔接順序に関する研究	(7)
I-4 低温応力除去法の研究	(10)
I-5 ピーニングに関する研究	(12)
II 自動熔接の実用化に関する研究	
II-1 自動熔接機の性能調査	(15)
II-2 サルファークラック防止法の研究	(19)
II-3 自動熔接用溶剤に関する研究	(23)

# Investigations on the Establishment of Welding Techniques suitable for the Japanese Shipbuilding Practice

## Abstracts

### I Studies on the Residual Stresses and Deformations in Welded Ships

#### I-1 Survey of Shipyard Welding Practices

In order to facilitate the direct application of the results of fundamental researches on the shipyard practices the research programs, such as conditions of experiment, must be selected to have close connection with the real practice. An investigation was performed for the purpose of obtaining exact knowledges about the present day practices in Japanese shipyards. This survey was conducted concerning with not only items directly related to the problem of deformation, such as standard welding conditions adopted for each plate thickness, size and forms of strong-backs and etc., but also with general problems of ship welding, such as organization of welding division, welding equipments and so on. The following twelve representative yards were investigated in this survey:

Ishikawajima Heavy Industries Co., Nippon Steel Pipes Co. Tsurumi and Shimizu Shipyard, Mitsubishi Nippon Heavy Industries Co. Yokohama Shipyard, Uraga Shipyard, Hitachi Shipbuilding Co. Sakurajima and Innoshima Shipyard, Kawasaki Heavy Industries Co., Shin-Mitsubishi Heavy Industries Co. Kōbe Shipyard, Harima Shipbuilding Co., Mitsui Shipbuilding Co. and Mitsubishi Shipbuilding Co. Nagasaki Shipyard.

#### I-2 Researches on the Residual Stresses in Constrained Joint

Serial experiments were performed on the effects of welding procedures upon the shrinkage and residual stresses of constrained butt joint.

The type of specimen used here is the ring form one somewhat different from those utilized so far. This type of specimen is used in order to facilitate the analysis of closing motion of plate edges during the progress of welding and the distribution of residual stresses. Five series of experiment were performed using the seven types of specimen.

The measurement of transverse shrinkage were performed at each layer of welding. The results obtained so far are summerized as follows:

##### 1) The mean shrinkage

There exists a linear relation in the multilayer welding, between mean shrinkage  $\bar{u}$  and logarithm of rod consumption per unit weld length  $\log w$  which is directly related to the sectional area of deposited metal, namely:

$$\bar{u} = \bar{u}_0 + b (\log w - \log w_0)$$

where,  $\bar{u}_0$ : mean shrinkage at the welding of first layer,

$w_0$ : weight of electrode consumed per unit weld length at the welding of first layer,

$b$ : physical constants determined by the type of specimen, welding procedures and other conditions.

The effect of welding procedures on the transverse shrinkage were investigated by the above equation touching upon the mechanism of shrinkage. The main results are as follows:

( i ) Effect of electrode diameter

The shrinkage decreases with the increase of the diameter of electrode. This benefit of using the larger electrode seems to be obtained at the welding of first layer.

( ii ) Effect of weaving motion and peening

The weaving bead method seems to produce less shrinkage than the stringer bead method. Shrinkage decreases by peening.

( iii ) Effect of type electrode

Large value of shrinkage was produced in case of low hydrogen type electrode.

( iv ) Effect of degree of constraint

Shrinkage decreases in accordance with the increase of degree of constraint, if the weld length is maintained unchanged; but the shrinkage seems to become larger with the increase of weld length even when the degree of constraint is equal.

( v ) Submerged arc welding

Submerged arc welding produces much less shrinkage—nearly 1/3—than hand welding.

2) Form of shrinkage

The shrinkage due to welding is not uniform along weld line. As the form of shrinkage is nearly linear, the shrinkage was investigated as the combination of uniform shrinkage and rotational motion of plate edges. A dimensionless parameter  $\alpha$ , defined by Eq. (1), is used for the analysis of form of shrinkage.

The rotational component in the shrinkage  $\alpha$  is nearly equal to 1 at the first layer when the welding has been done from the inner circle to the outer one. In the first layer, therefore, pure rotation rather than shrinkage occurs. The value of  $\alpha$  gradually decreases after the second layer and sometimes begins to increase at the final stage.

On the other hand, when welding is made from the outer circle, the value of  $\alpha$  is nearly equal to -1 at the first layer, but it becomes about zero at the second layer, and the value  $\alpha$  becomes positive and nearly equal to the one obtained in case of welding from the inner circle after the third layer.

However, even in these cases, when the tack weldings are performed at the opposite side before welding, uniform shrinkage will be obtained as the rotational motion of plate edges is prevented by tack welding.

The case is quite different with submerged arc welding. When welding is performed from the inner circle,  $\alpha$  is always negative and becomes more negative at the second layer. On the other hand, when welding is done from the outer circle,  $\alpha$  increases at the second layer.

3) Importance of first layer

The first layer has a nature far more important than the layers after the second both in the mean shrinkage and the form of shrinkage.

### I-3 Effect of Welding Sequence on Residual Stresses

Effect of welding sequence on transverse shrinkage and residual stresses was also investigated. Two-hole type specimens,  $1800 \times 900 \times 19$  mm, were used in this experiment. Butt-joint of 1000 mm long was prepared in the middle part of specimen. The welding sequence and techniques were changed as shown in the following:

- Progressive block method
- Skip block method
- Cascade method
- Symmetry method
- Unionmelt method

The transverse shrinkage was measured at some stages of welding. The results obtained for each specimen are shown in Fig. 7. The form of shrinkage at the final stage of welding is listed in Fig. 8. Among these five conditions of welding the Unionmelt method showed the least shrinkage. In case of hand welding, the form of shrinkage was considerably changed in accordance with the change in welding sequence, though the value of shrinkage did not change so much.

### I-4 Studies on Low Temperature Stress Relieving

The mechanism of low temperature stress relieving was investigated through two kinds of experiment. At the first stage of research, a fundamental experiments were performed using a simple constrained specimen as shown in Fig. 11. The central or side bars in which tensile or compressive stresses were occurred, respectively, were heated by oxy-acetylene flame to various temperatures and then cooled by water. The reduction of residual stress due to this heat cycle was then measured. The residual stress remarkably reduced when the side bars were heated, however, it hardly changed when the central bar was heated. The maximum reduction of residual stress was achieved when side bars were heated to about  $150^{\circ}\text{C}$ . An analytical consideration for this problem was also tried. Calculated values of stress reduction were closely coincided with experimental results.

Next, an experiment concerning with the application of low temperature stress relieving on pipe joint was performed. Welded pipes of  $200 \text{ mm } \phi$ , 7 mm thick and 500 mm long with circumferential or longitudinal joint were prepared for this experiment. The results of experiment were shown in Fig. 14. From these results it can be desided that the low temperature stress relieving treatment seems to be applicable to welded pipes in place of stress annealing from the view point of stress relieving.

### I-5 Studies on Peening

Some experiments were made to determine the effects of peening on the residual stress relieving and the properties of peened weld metal for the low-temperature brittleness in the butt weld joints, which were prepared from two plates of  $1200 \times 500 \times 19$  mm by manual welds. The conditions of experiments are as follows:

- Cold peening on every layer by 2" stroke peening tool (Spec. No. 1),
- Cold peening on every layer by 3" stroke peening tool (Spec. No. 2),

Cold peening on only finishing layer by 2" stroke peening tool (Spec. No. 3),  
As welded condition (Spec. No. 4),  
Hot peening on every layer by 2" stroke peening tool (Spec. No. 5).

The residual stresses as welded and after peened were measured by three methods successively, for the purpose of increasing the reliability of measured data. Electric resistance-wire strain gages were mounted on the test specimen, and then the specimen was drilled by a drilling machine. The measurement of stress were performed at following stages:

1. One hole relaxation stage (Mathar method),
2. Two hole relaxation stage,
3. Plug relaxation stage,
4. Whole relaxation stage.

Examples of measured stress distribution are shown in Fig. 17. The mean values of longitudinal stress on the weld line are listed in Table 3. As it is shown in the figure and table, a considerable reduction in residual stress was achieved by peening.

Longitudinal bend test of specimen (Austrian bead bend test type) was conducted at the temperature range of  $-65 \sim -70^{\circ}\text{C}$ . The results of this test are also listed in Table 3.

The following conclusions appear to be warranted ;

1. The first layer shall not be peened.
2. Peenig of the last layer should be considered a dangerous practice which greatly increases the hazard of low temperature brittleness.
3. Hot peening confers the undesirable effects on the properties of weld metal.
4. The welds shall not be over peened.
5. As the stress relieving procedure peening only the last layer by 2-in. stroke is even effective.
6. Transverse stresses were lowered to some extent by peening.

## II Studies on the Application of Automatic Welding

### II-1 Investigations on the Performance of Automatic Welding Machines

Comparative surveys on the electrical and mechanical performances of various automatic welding machines were conducted. The following representative welding machines were chosen for this investigation:

Lincoln Automatic Welding Machine,  
Linde Unionmelt DS and UE Type Machine,  
Fusarc Welding Machine,  
Brown Boveri "Uni" Automatic Welding Machine.

In this investigation static and dynamic characteristics of electrode feeding equipment were studied. Investigations on the usability of welding were also conducted. The results obtained so far are summarized as follows:

- 1) Static and dynamic characteristics of electrode feeding system

In order to perform the automatic welding successfully the feeding speed of electrode must be sensitively controlled in accordance with the change in arc voltage. At first, the static characteristic is said to be in good condition when a small change in arc voltage produces a fairly significant change in feed motor speed. Experimental studies on this characteristic were conducted. The results of this study are shown in Figs. 19 & 20.

Studies on the dynamical responsibility were also carried by oscillograph. The results are shown in Figs. 21 & 22.

Through these experimental investigations, B. B. C., Lincoln and Unionmelt type UE welding machines showed good performances.

## 2) Usability of welding machine

Questionnaires regarding the usability of automatic welding machine were distributed to representative shipyards. In this investigation the Unionmelt UE type welding machine showed the best results among the above mentioned various welding machines.

## II-2 Studies on the Prevention of Sulpher Cracks

When the submerged arc welding is adopted to a sulphur banded steel plate, there often occurs crackings in deposited metal. This type of crack generally starts from sulphur bands of base metal and propagates along the dendritic structure of weld metal, and consequently it is sometimes called "sulphur crack" in Japan. As Japanese steel plates are liable to contain rich segregations of sulphur, it is a very important matter in regard to the sound application of automatic welding to establish an effective method of preventing sulphur crack.

In this investigation two kinds of experiment were conducted, the microscopic surveys on the mechanism of origination of this crack, and the effect of sulphur crack on the fatigue strength of welded joint.

### 1) Studies on the mechanism of origination of sulphur crack

Microscopic surveys were conducted upon sulphur cracks occurred in rimmed, semi-killed and killed steel. The results are shown in Photographs 2~5. Main conclusions are summarized as follows:

(i) There exists a close relationship between sulphur band and sulphur crack. Sulphur crack originates from the point of segregation of sulphur and propagate along the dendritic structure of weld metal.

(ii) However, many kinds of segregation, such as oxides of FeO, MnO or silicate and some kinds of sulphides, were recognized in sulphur cracks. Consequently, much attentions must be held to the composition of sulphides and the quantity of oxides.

### 2) Effect of sulphur crack on the fatigue strength of welded joint

Effect of sulphur crack on the fatigue strength of welded joint was investigated using the Scchenck type fatigue testing machine. Three kinds of steel, A, B and C of which chemical compositions are listed in Table 9 were used in this experiment. The specimens were repeatedly stressed under purely alternating equal load. The results are shown in Fig. 26. As it is shown in the figure, the fatigue strength gradually decreases in accordance with the increase of length of sulphur crack.

### II-3 Studies on Automatic Welding Flux

Systematic investigations on the properties of fluxes used in submerged arc welding were also carried out.

At first, investigations on the chemical properties of commercially produced fluxes were performed. According to the result of this survey, many of these fluxes are of chemical compositions of  $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$  and  $\text{SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ , excepting some special ones rich in  $\text{MnO}$ .

Special fluxes of 44 kinds in the total were made in the laboratory in order to perform a systematical studies on the effect of chemical composition of flux on the property of weld metal. Surveys on micro-structure and mechanical property of weld metal, crack sensitivity and etc. were conducted in this experiment.

Many valuable knowledges concerning with the behaviour of flux used in submerged arc welding were obtained through this investigation. For instance, the effect of basicity of flux on sulphur crack were clarified.

# わが国の造船工作に適した熔接技術確立の研究

## 緒 言

船体建造への熔接の応用は欧米各国とも第2次大戦を契機として著しい発達をとげ、熔接は従来の鉄接にとつて代り、船体建造の主要過程となるに至つている。これは熔接の採用によって船体重量が大幅に軽減しうるなど熔接には多くの長所があるからであるが、反面熔接船においては脆性破壊の危険性があるとか、変形や残留応力を生ずるなどの欠点もあるので、信頼性の高い熔接船を建造する為にはこれらの点について充分なる知識をもち適切なる処置をとらなければならない。

終戦直後におけるわが国の造船技術に関しては熔接の応用の面ではかなり遅れており、これを急速に発達させる必要があつた。この場合わが国では気候、風土の点で欧米諸国とはかなり異なるだけでなく鋼材事情等にも幾多の差異がある。例えば熔接の高能率化を図るために自働熔接を採用することが望ましいが、わが国の鋼材においては硫黄の偏析が著しく、そのためサルファークラックと称する熔着鋼割れが屢々発生し、自動熔接の実用化を大いに妨げたのである。従つてわが国における船体熔接技術の発展のためにこれらについても充分考慮に入れ、わが国の造船工作に適したものとしなければならない。

本研究はこの目的に対して行われたものであるが、ここでは「船体熔接における残留応力及び歪の軽減に関する研究」及び「自動熔接の実用化に関する研究」の2項目を取り上げた。このうち第1の項目は日本熔接協会の協力をえて当研究協会において取扱つたが、第2の項目は日本熔接協会において実施したものである。

なお、これらの研究項目についてはその後の研究により技術的に著しく発達をみている。例えば第2項目においておもに取上げたサルファークラックの問題は鋼材の品質改善、熔剤及び心線の選択、施工法の工夫等により今日ではほぼ解決されるに至つている。

## I 船体熔接における残留応力及び歪の軽減に関する研究

### I-1 各造船所における船体熔接工作法の調査

船体熔接における残留応力及び歪の軽減に関する研究を行うに當り、研究成果を直ちに現場に応用するためには、実際の工事における施工の実態を知り、研究課題の焦点、実験条件などをできるだけ実際に即したものに選定する必要があると考え、この調査を行つた。調査の主目的は歪及び残留応力の研究の指針を得ることにあるのであるが、この問題に関する根本的な検討を行うためには更に基礎的な資料が必要であるので、各板厚に対する標準熔接条件、ストロングバック類の使用方法など歪の研究に直接に關係する項目の他に、熔接部門の管理機構及び組織、熔接関係の設備、熔接棒の使用状況などの調査も併行して行つた。

調査の対象となつた造船所は、石川島重工、日本钢管鶴見造船所、及び清水造船所、三菱日本重工

横浜造船所、浦賀造船所、日立造船桜島工場及び因島工場、川崎重工、新三菱重工神戸造船所、播磨造船所、三井造船、三菱造船長崎造船所の12工場である。

調査はアンケート式であるが、その調査項目は下記の如くである。

## 1. 熔接部門の管理機構及び組織

### 1・1 技術管理責任の所在

熔接に関する最高責任者、組立順序の立案採択、熔接順序の研究立案、熔接施工の決定

### 1・2 養成機関

熔接工養成に関する設備、指導員の有無、収容能力、平均授業時間、進級に要する期間、技術向上のための奨励制度の有無及びその方法

### 1・3 請負制度の良否

熔接工事能率向上のための方策、同技術向上のための方策、社外工

### 1・4 監督方法

船殻工事における工場及び工事単位制の採択状況、船主及び船級協会の監督状況等

### 1・5 檢査の権限

熔接専用の検査部門の有無、検査の方法等

### 1・6 熔接部門の職制

### 1・7 電気熔接工の技倅別、職種別員数表

## 2. 設備

### 2・1 熔接工場の占める地理的関係及び作業能力

材料置場、酸素及びアセチレンの供給方式、ガス切断の使用状況、組立場の使用状況、定盤の面積、船台能力等

### 2・2 電源配置及び配線

工場の一次側電源電圧、熔接トランスの能力、電力使用量等

### 2・3 熔接機

各部別熔接機能力及び使用状況、熔接機の移動方法、自動熔接機の種類、台数、使用状況

### 2・4 電纜

### 2・5 ホルダー金物

### 2・6 熔接用諸道具

### 2・7 熔接機設置台の図面または写真

## 3. 熔接棒

### 3・1 熔接棒使用量

### 3・2 熔接棒管理方式

### 3・3 各種熔接棒比較及び使用率

熔接棒性能比較表、棒種別熔接棒用量

## 4. 標準熔接条件

### 4・1 手熔接に対する板厚別標準開先及び熔接法

## 4・2 自動溶接に対する板厚別標準溶接条件

### 5. ストロングバック類の使用方法

#### 5・1 各種治具類の標準寸法

#### 5・2 同上 使用方法

#### 5・3 同上 管理方法

これらの各項目について調査を行つた。調査結果の詳細は紙数の関係もあるので省略するが、溶接工作法の基礎的事項がかなり明らかとなつた。

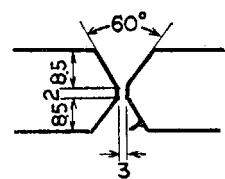
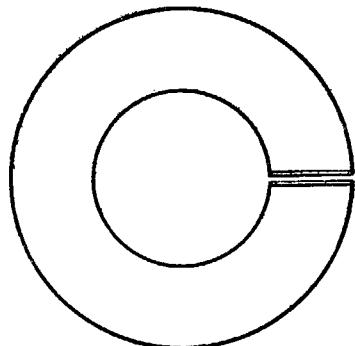
## I-2 拘束接手における残留応力に関する研究

溶接による収縮及び残留応力が溶接施工法によって如何に変化するかということは、溶接を構造物に応用する際極めて重要な問題であるが、現象として非常に複雑であるため現在の所では殆んど未解決であつて、例えば太径棒を用いて少い層数で溶接した場合と、細径棒を用い、多層で溶接した場合とでどちらが収縮が少いかと言つた基本的な問題についてもはつきりした結論が得られていない状況である。本研究はその最も基本的な問題と考えられる単位巾の溶接部を溶接する際の横収縮が溶接施工法によって如何に変化するかを検討したものである。

試験片としては第1図に示すような円輪型の拘束試験片を用いた。この試験片は従来この種の研究に用いられた多くの試験片とはその形状がかなり異つているが、これは溶接の進行に伴う開先の移動、或は残留応力に関する検討に際して解析を容易ならしめるためである。試験片としては外径 600 mm、内径 300 mm、板厚 19 mm、開先形状は対称 X型、溶接棒としてはイルミナイト系 4 mm  $\phi$  にて円輪の内側から外側へ、表裏交互にストリンガービードで溶接する場合を標準の実験条件とし、試験片の形状、棒径、溶接棒の種類、運棒法、溶接方向などを種々に変えた。サブマージドアーク溶接に関する実験、ならびにピーニングに対する実験も 2, 3 行つた。実験は 5 つの系列に分けて実施したが実験条件としては合計 32 条件である。使用した試験片の寸法及び実験条件をそれぞれ第1及び第2表に示す。

横収縮の計測はコンパレーターによつた。この際各層溶接毎に板の表裏各十数点について収縮の測定を行い、収縮の詳しい形状を求めると共に、各層溶接毎に収縮の増加して行く状況を検討するようにした。

溶接による角変化のため、表裏の収縮量は異なるので、横収縮としては表裏の平均をとつた。



第1図 円輪型拘束試験片

第1表 試験片寸法(円輪型拘束試験片)

試験片の型式	外径mm	内径mm	溶接長mm
106	1,000	600	200
96	900	600	150
86	800	600	100
73	700	300	200
63	600	300	150
53	500	300	100
42	400	200	100

第2表 実験条件

実験番号	研究目的	試験片番号	試験片の型式	熔接棒		熔着法	熔接方向	層数	備考
				種類	棒径				
1 棒径と層数 の影響		11	63	イルミナイト系 (B-17)	3.2	シングル・ビード	内→外	12	
		12	"	"	4	"	"	8	
		13	"	"	6	"	"	6	
		14	96	"	3.2	"	"	12	
		15	"	"	4	"	"	8	
		16	"	"	6	"	"	6	
2 熔接方向の 影響 (ユニオン (メルト)		21	106	イルミナイト系 (B-17)	4	シングル・ビード	内→外	8	
		22	"	"	"	"	外→内	"	
		24	73	"	"	"	内→外	"	
		25	"	"	"	"	外→内	"	
		27	"	"	"	"	内→外	"	外側に仮付熔接
		28	"	"	"	"	外→内	"	内側に仮付熔接
		23	106	ユニオンメルト 熔接			内→外	2	
		23'	"	"			外→内	"	
		26	73	"			内→外	"	
		26'	"	"			外→内	"	
3 運棒法及び ピーニング の影響		31	53	イルミナイト系 (B-17)	4	シングル・ビード	内→外	8	
		32	"	"	"	ウイーピング・ビード	"	6	
		33	"	"	"	シングル・ビード	"	8	ピーニング
		34	86	"	"	"	"	8	
		35	"	"	"	ウイーピング・ビード	"	6	
		36	"	"	"	シングル・ビード	"	8	ピーニング
4 熔接棒の種類の影響		41	42	イルミナイト系 (B-17)	4	シングル・ビード	内→外	8	
		42	"	高チタニヤ系	"	"	"	"	
		43	"	高セルローズ系	"	"	"	"	
		44	"	低水素系	"	"	"	"	
5 棒径と層数 の影響		52	63	イルミナイト系 (G-200)	2.6	シングル・ビード	内→外	10	
		53	"	"	3.2	"	"	8	
		54	"	"	4	"	"	"	
		55	"	"	5	"	"	6	
		56	"	"	6	"	"	"	
		58	"	"	8	"	"	4	

横収縮量は熔接方向に関して一様でなく、第2図に示す如く一般には内周より外周の方が大となる。そこでこれを直線とおき、次式の如くにして整理した。

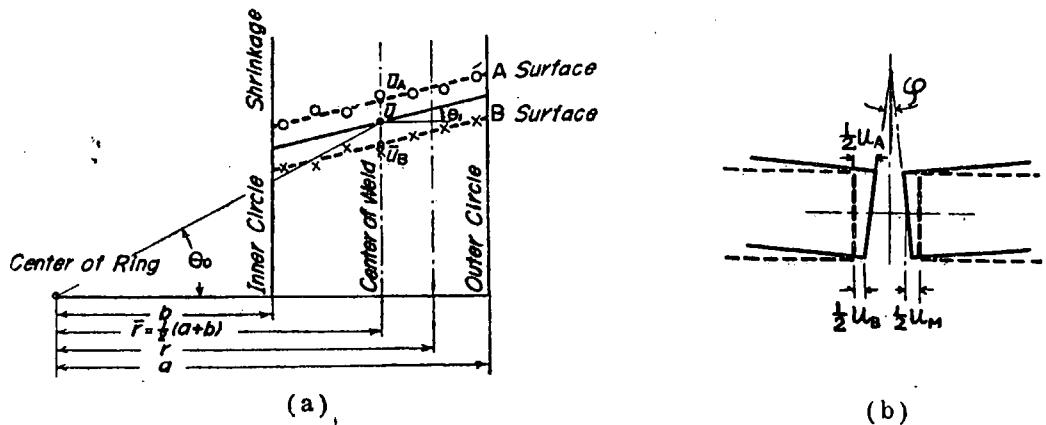
$$u = \bar{u} \left\{ 1 + a \left( \frac{r}{\bar{r}} - 1 \right) \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

但し  $u$ : 収縮量

$r$ : 円輪の中心からの距離

$$\bar{r} = \frac{1}{2} (a + b) \quad a: \text{外半径} \quad b: \text{内半径}$$

ここで  $\bar{u}$  は表裏での全計測値の平均と考えられるのでこれを“平均収縮量”と名付けた。また  $a$



## 第 2 図 収 縮 形 状

(註) 表面(A面)及び裏面(B面)で計測した収縮を夫々  $u_A$ ,  $u_B$  とすれば、平面的な収縮  $u$  及び角変化  $\varphi$  は次式で与えられる。

$$\bar{u} = \frac{1}{2} (u_B + u_A)$$

$$\varphi \doteq \frac{1}{t} (u_A + u_B)$$

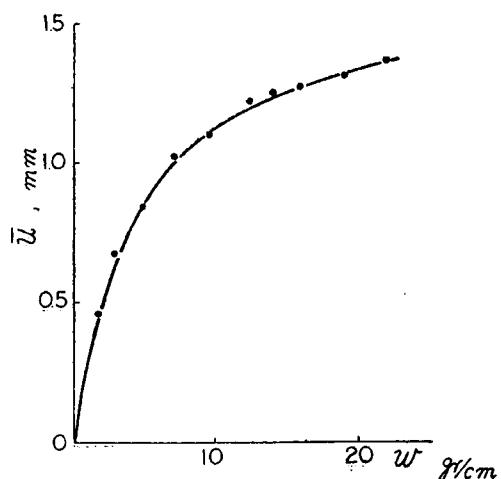
$\pi$  は熔接線方向に一様でなくほぼ直線的に変化する。そこでこれを(1)式の如くに考えた。

は収縮量の熔接方向の傾斜を表わす無次元量であつて第2図において収縮直線の傾斜を  $\theta_1$  とした場合、次式で示されるものである。

$\alpha$  は定義より明らかに、 $\alpha = 0$  は一様な収縮を示し、内周より外周の方が収縮が大ならば  $\alpha > 0$ 、反対に内周の方が収縮が大ならば  $\alpha < 0$  であつて、 $\alpha = 1$  は円輪の中心での回転を意味する。従つて  $\alpha$  は“収縮量の中に占める回転成分の量”を示すパラメータと考えられる。かく実験結果を整理することによつて平均的な収縮量については  $\bar{\alpha}$  により、収縮形状並びにその変化については  $\alpha$  を用いて解析を行つた。解析の結果得られた結論の大要を以下に示す。

### [I] 平均收縮量

多層熔接においては層数がますに従つて収縮は増加するが、この場合の熔着量と収縮量との関係は第3図の如くで、初層及び第2層において既に相当の量に達し、それ以後は熔着量は増加しても収縮量はあまり増加しなくなる。この場合収縮量と熔接棒使用量（或は熔着量）の対数との間にはほぼ直線的な関係が成立する。すなわち単位熔接長当たりの熔接棒使用量  $w$  gr/cm と平均収縮量



第3図 熔着量と収縮量との関係

(註)  $\bar{u}$ ：平均收縮量

w: 単位熔接長当たりの熔接棒使用量

\* 実験結果解析の便宜上常用対数を一般に用いる。

或は

但し  $w_0$ : 初層熔接時の単位熔接長当たりの熔接棒使用量

$\bar{u}_0$ : 初層熔接時の平均収縮量

*b*: 試験片の拘束度、熔接条件等によって定まる常数

M. log

$$M: \log_{10} e = 0.4545$$

(3) 式は多層熔接においては熔接が進行し、熔着量が増加するに伴つて収縮に対する抵抗が増加し、単位の熔着量の増加に対する収縮の増加量が熔着量に逆比例して減少して行くことを示している。またこの関係を利用することによって熔接施工法が収縮量に及ぼす影響を収縮の機構にふれつつ組織的に検討することができる。すなわち(3)式は収縮を減少させる手段として次の3つの方法があることを示している。

(i) 第4図矢印①の如く最終的に熔着する量を減少させる。(収縮はBよりCまで減少する)

(ii) 第4図矢印②の如く、収縮の増加傾向を示す傾斜 $b$ を少くする。(収縮はBよりDまで減少する)

(iii) 初層熔接時の熔着量と収縮量との関係を矢印③の方向に持つて行く。(初層の点が A より A 少する)

今回の実験では熔接施工法の全般に亘つては調査できなかつたが、今回対象になつた事項についてその概要をしるせば次の如くであつた。

( i ) 棒径の影響

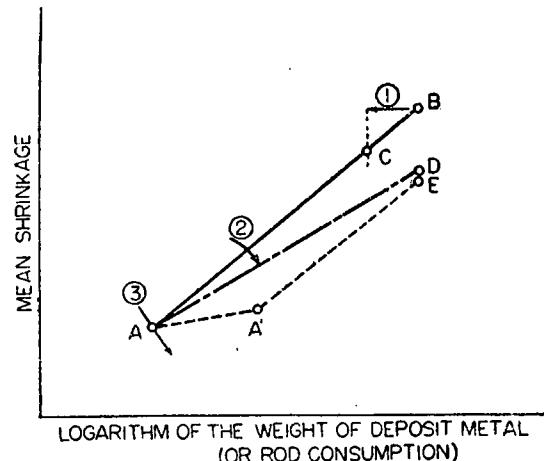
太径棒を用いた場合は収縮は少なかつたが、その効果は主として上述③の効果と考えられる。すなわち太径棒を用いると各層毎の熔着量が増加する。従つて初層熔接時の熔着量が大となり、その時の収縮量は細径棒を用いて少し盛った時の初層での収縮量よりは大であるが、同じ熔着量まで細径棒を用いて数層で熔接した時のそれよりは少く、傾斜 $b$ には差がないので、結局は太径棒の方が収縮は少い。

(ii) 運棒法 ピーニングの影響

運棒法としてはウィーピングの方が収縮が少いが、これも同様③の効果と考えられる。またピーニングによって収縮量は減少する。

(iii) 棒の種類の影響

低水素系熔接棒では収縮量が大きかつた。また、この際は上述②の効果があつたように見受けられた。



第4図 熔着量の対数と収縮量との関係

#### (iv) 拘束度の影響

拘束度が大なるほど収縮は少くなる。然しこの場合溶接長も収縮量に影響があるようで、溶接長が長くなると、同じ拘束度でも収縮は増加するようであつた。

#### (v) サブマージドアーク溶接

この場合は収縮量は極めて少く、手溶接の約  $1/3$  に過ぎなかつた。

#### [II] 収縮形状並びにその変化

収縮形状は溶接線方向に一様でなく大体直線的に変化し、また溶接層数がますとその形状は変化する。即ち内周から外周へ溶接すると、第5図に示す如く  $\alpha$  の値は初層では1に近く、従つて初層は収縮というよりは回転に近いが、層数がますと減少し、ある一定値に近づく。(最終層に近づくと再び増加することがある)一方外周から溶接すると、初層では  $\alpha$  は -1 に近いが、層数をますと増加し、最終層に近づくと内周から溶接した場合と変わらなくなる。この場合、反対方向を予め仮止しておくと、初層における回転はなくなり、溶接方向の如何に關らずほぼ一様な収縮が得られる。また最終層において溶接方向の差がなくなる点については試験片として歪エネルギーの最も少くなる方向に近づくと考えると理解しやすいように思われる。また、サブマージドアーク溶接の場合はこの傾向は非常に異つている。この点についてはよく分らないが、試験片として安定な方向に近づこうとする傾向よりは溶接方法に起因する傾向の方がこの場合は強いためではないかと考えている。

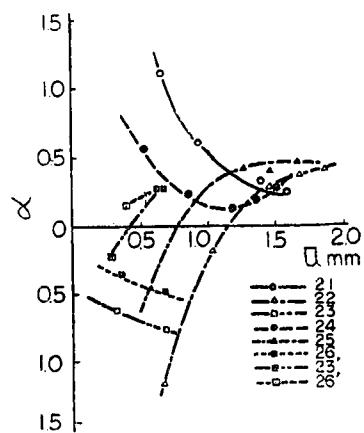
#### [III] 初層の重要性

平均収縮量についても、収縮形状についても初層は2層以後とはかなり異つた性質を示し、溶接施工法の影響を検討するに際し、極めて重要なものである。これは初層の溶接が離れ離れの2枚の板を接合する操作であるのに対し、それ以後の層においては既に接合された板を更に収縮させるに過ぎないという収縮機構上の本質的な差異に由来するものと考えられる。従つて溶接施工法の選定に当つては特に初層の溶接には慎重な態度が必要であり、今後更に研究を進める必要がある。初層においてはまだ板が冷却された状態にあるため冷却速度が大になり易いとか、溶着金属断面積が小さいとか言つた点も勿論重要な事項であるが、上述した収縮機構上の差異という点にも注意を払つてよいと思う。

### I-3 溶接順序に関する研究

溶接順序が溶接々手の残留応力に如何に影響するかという問題は拘束度が大きく、接手の横収縮が阻止されて大きな transverse stress が発生する場合は重要なものである。

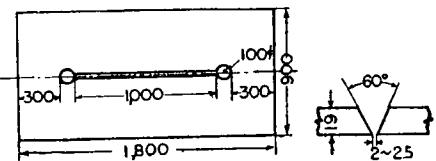
一般に溶接々手の残留応力に影響すると考えられている諸因子としては拘束度、板厚、溶接棒の種類、棒径並びに層数、溶接方向、溶接順序、溶接方法、開先形状、開先間隔、運棒法、ピーニング、裏はり、予熱、後熱等があり、極めて複雑な現象として古くから多くの研究が行われているが、未だ結論がえられるまでに至つていない。これらの要因のうち溶接順序のみの影響をとり出すことは困



第5図 平均収縮量( $u$ )と回転成分( $\alpha$ )との関係

(註) (実験条件に関しては第2表参照)

難であるが、他の条件をできるだけ一定に保つようにして実験を行つた。すなわちこの場合には熔接線方向に熔着金層を配置する順序と、多層盛りの盛り方の順序とに着目し、ブロック法3種類と各層毎に対称に完成して行く symmetry 法とについて比較し、他に手熔接と自動熔接との差を検討するために Unionmelt 法についても実験を行つた。



第6図 2円孔型拘束試験片

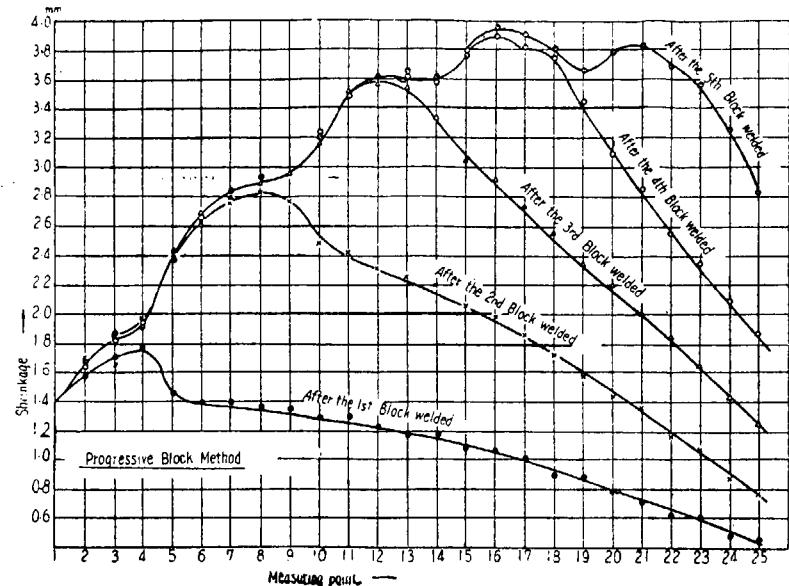
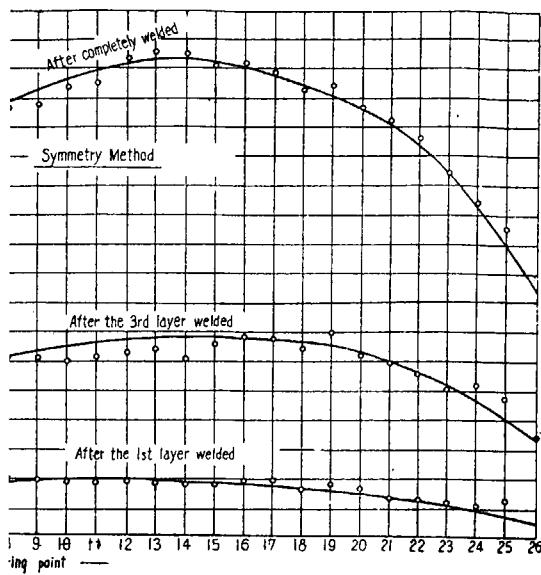
試験片には第6図に示すような二円孔型拘束試験片を用いた。試験片寸法は  $1,800 \times 900 \times 19$  mm で、中央に長さ 1,000 mm の開先を設け、その両端には  $100 \text{ mm}\phi$  の孔を開けた。開先は  $60^\circ$  V型とした。試験片枚数は Progressive method 1枚、Skip block method 1枚、Cascade method 2枚、Symmetry method 1枚、Unionmelt method 2枚、合計 7 枚である。手熔接にはすべてイルミナイト系熔接棒（神戸製鋼 B-17）を使用し、第1層のみ  $4 \text{ mm}\phi$ 、他はすべて  $5 \text{ mm}\phi$  のものを使用した。熔接条件は大体第1層を  $130 \sim 150$  Amp. 第2層以後を  $210 \sim 250$  Amp. とした。この際、盛り上りまでを数回に分けて熔接棒使用量とその時の横収縮分布を測定した。自動熔接は Oxweld No. 36 の心線に Grade 50 の Flux を使用し、同じく熔接棒使用量と横収縮とを測定した。測定は熔接長 1,000 mm を手熔接では 24 等分、自動熔接では 16 等分して各位置において裏表をコンパレータで測定し、収縮の分布を求めた。

各試験片に対する横収縮の分布図を第7図に示す。いずれの場合でも熔着量の増加と共に収縮はましているが、これらの分布図は各方法に対して極めて特徴のある形状を示している。

Symmetry method では第7図 (a) に示すように完全な対称形となつていて、Progressive method では第7図 (b) の如く方向性が顕著にあらわれ、熔接の進行方向に収縮は増加している。一部のブロックのみ熔接を行つた場合は熔接した部分に収縮を生ずるのは勿論であるが、未熔接の部分では回転を生じている。また新たに熔接をする場合以前に完成していた部分では更に収縮を生じない。これらの影響が重畠する結果熔接の進行方向に収縮は増加している。Skip block method での結果は第7図 (c) に示すごとくであつて、上述した2つの傾向は非常に顕著にあらわれている。従つてこの方法によつてえられた収縮の形状はあるブロックの熔接による収縮を重畠して行くことにより、ある程度推定することが可能である。Cascade method は対称性を示し最終的には Symmetry 法と同じような傾向を示すが途中はかなり異なつていて、即ち第7図 (d) に示す如く中央ブロックが完成されてもその両側の収縮は少なく収縮分布はかなり急激に変化している。Unionmelt method は以上の4種の手熔接とは全く異り、第7図 (e) に示す如く、極めて横収縮量が小さく、また手熔接とは逆に熔接してゆくにつれて開先が開く傾向があるため先の方の収縮が小さくなつていて、

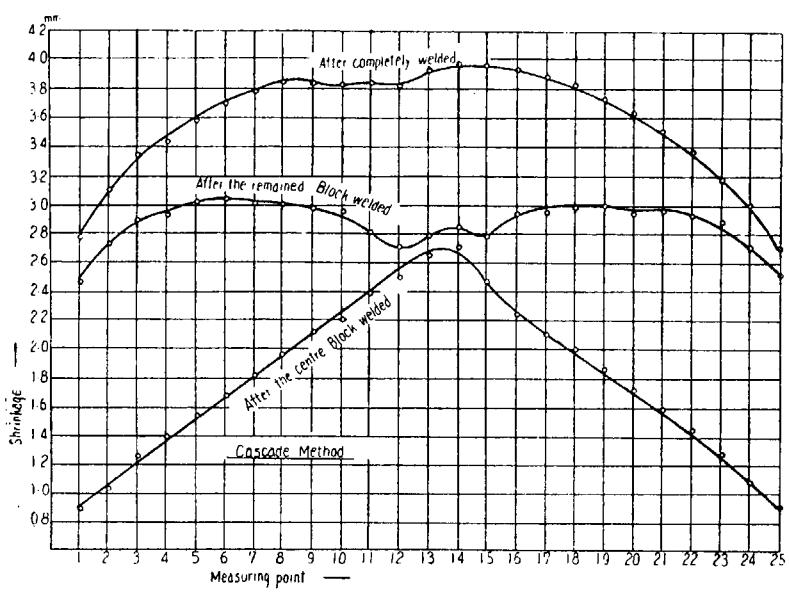
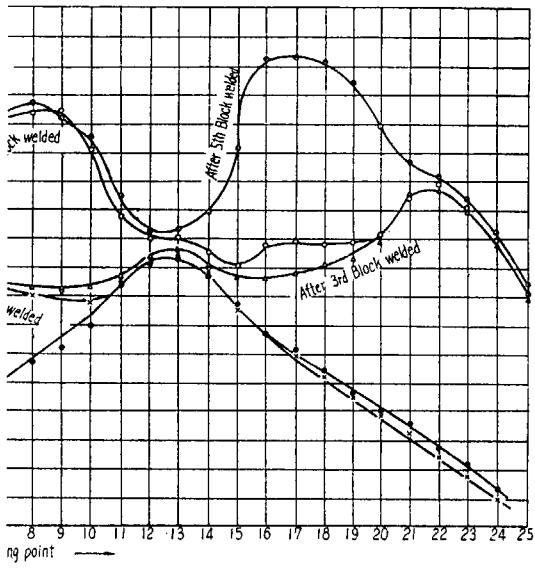
これらをまとめて最終状態のみを比較すると第8図の如く、手熔接は殆んど同じ程度の収縮量を示し、いずれの方法がすぐれているかを決定することは困難であるが、その途中特に第1層を熔接する際にはこの収縮分布形状が極めて重要な意味を持つてくる。

収縮分布曲線の面積を全長で割つた平均収縮量  $\bar{u}$  と熔接棒使用量との関係は各熔着法に対してそれぞれほぼ直線的関係を有し、第9図の如くになる。この図から比較すると熔着法の差はあまり出でおらず特に最終状態では一致してくる。然し熔着量の少い所では Cascade method が他の方法より幾分収縮量が大きい結果を示している。またこれらの直線の tangent は Progressive method が比



(a) Symmetry Method

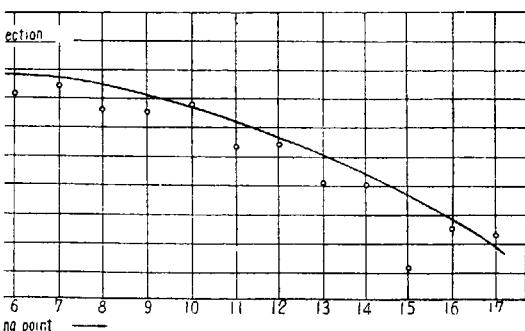
(b) Progressive Block Method



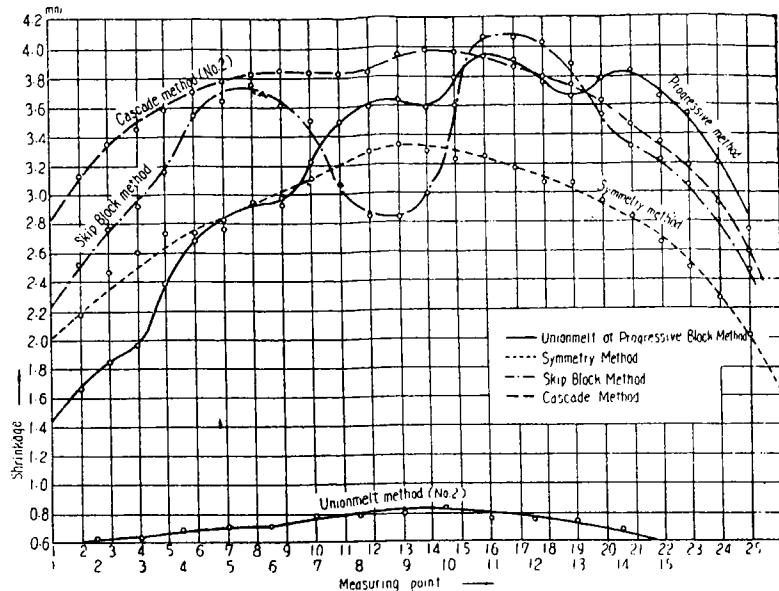
(c) Skip Block Method

(d) Cascade Method

method  
joining Side



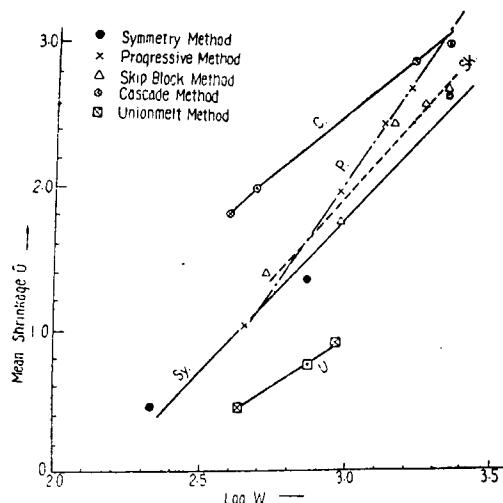
第 7 図 収 縮 の 形 状



第8図 熔接完了状態における収縮形状の比較

較的大きいようである。即ちそれぞれの直線の tangent の大きい方から並べると Progressive, Skip block, Symmetry, Cascade, Unionmelt の順となり、また最終状態での平均収縮量の順は Skip block, Progressive, Cascade, Symmetry, Unionmelt となり、Unionmelt が最もすぐれた結果を示している。手熔接の差はないが、強いて順位をつければ Symmetry が一番よく、次いで Cascade, Skip block, Progressive となつていて。

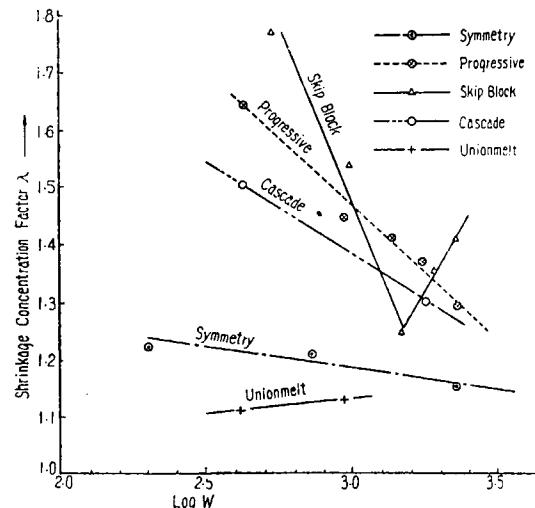
次に最大収縮量と平均収縮量との比即ち一様に収縮するか、或は一個所に急激な変化を生ずるかという収縮集中係数を各熔着量に対してとると第 10 図の如くになり、熔着量が増すにつれてこの比率



$$\begin{aligned} \text{Sym.} &; \bar{u} = -0.36 + 1.84 \log w \\ \text{Prog.} &; \bar{u} = -0.06 + 2.66 \log w \\ \text{Skip.} &; \bar{u} = 0.26 + 2.24 \log w \\ \text{Cas.} &; \bar{u} = 1.16 + 1.53 \log w \\ \text{Union.} &; \bar{u} = -0.06 + 1.22 \log w \end{aligned}$$

$\bar{u}$ ; Mean Shrinkage, mm.  
 $w$ ; Weight of Electrode Consumed, gr.

第9図 熔接棒使用量と平均収縮量との関係



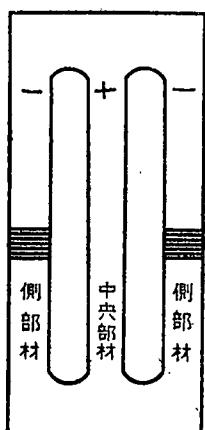
$$\lambda = \frac{u_{\max.}}{u_{\text{mean}}}$$

第10図 熔接棒使用量と収縮集中率  
 $\lambda$  との関係

$\lambda$  は減少している。Skip block method は最後に熔接する第 4, 第 5 ブロックの両側が既に固つてゐるために相当急激な歪変化を生じ、第 3 ブロックに比し、第 5 ブロックとなるにつれて再びこの係数が増大している。Unionmelt は熔着量の増加と共にこの係数が大となり手熔接とは逆に第 1 層より第 2 層の方が彎曲してくるのを示している。これらの収縮分布形状の Sharpness と残留応力分布との関係は未だ明らかでないが、今後の研究課題の一つと考えられる。

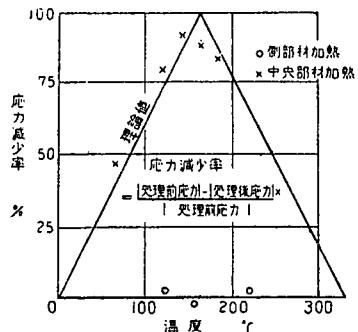
#### I-4 低温応力除去法の研究

米国及び欧洲においては船体構造やガスタンク等焼鈍のできないような大型構造物の熔接残留応力を緩和する目的で、Oxy-acetylene 焰をもつて熔接線の両側を 150~200°C に加熱水冷する方法が一部採用せられており、この方法の応力緩和に対して有効なることは国際熔接会議において認められている。わが国においても突合せ熔接の場合についての確認実験は渡辺らによつて遂行せられた。

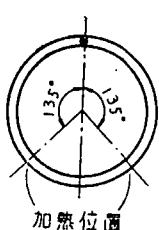


第 11 図 試験片

しかしながら、何時の場合でも熔接線の両側を処理すればよいといふ訳でなく、応力分布の特性に対応した処置が採られなければならぬ。本方法の応力緩和の機構は他の応力緩和法（例えばピーニング、過歪法等）の機構と全く同様であつて、これらの処理を行うことにより、引張りの残留応力の残つてゐる所に更に引張りの塑性歪を与えることにより拘束の状態を緩和せんとするものである。突合熔接々手の場合接線の両側（圧縮応力が残留してゐる）を加熱することにより熔接部に引張りの塑性歪を与えることになる訳である。水冷するには熔接部に熱の伝導することを防ぎこの効果を授けるためである。このことは理論的にも証明し得るが先づ次の如き実験を試みた。第 11 図に示す如き拘束試験体において、熔接を行つてゐる部材に引張応力 (+ 記号で表わす)、しかるべく部材に圧縮応力 (- 記号で示す) が残留してゐる。今圧縮応力の働く中央部材をガス焰により種々の温度で加熱水冷した場合及び引張応力の働く両側部材を行つた場合について残留応力の減少率の実験結果を図示すれば第 12 図の如くなる。これより明らかな如く引張応力の残留する両側部材に本法を適用したのでは応力減少率は殆んど零であるのに対し、圧縮応力の残留する中央部材を加熱水冷すれば応力値は減少する。これを理論解析したものと図中の実線で示してある。

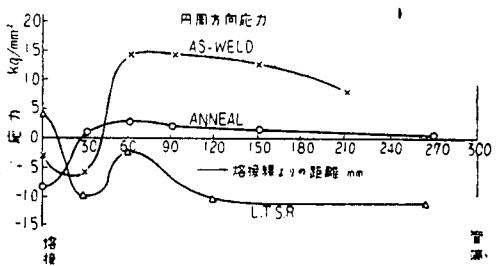
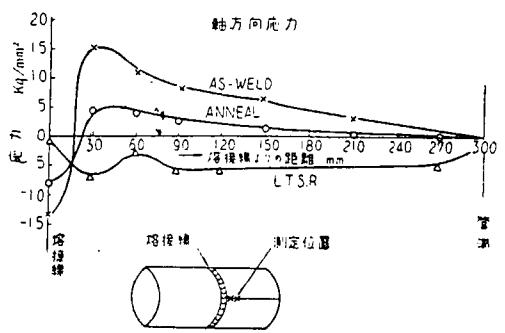


第 12 図 加熱温度と応力減少率との関係

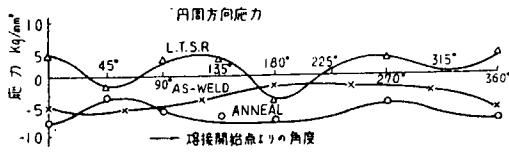
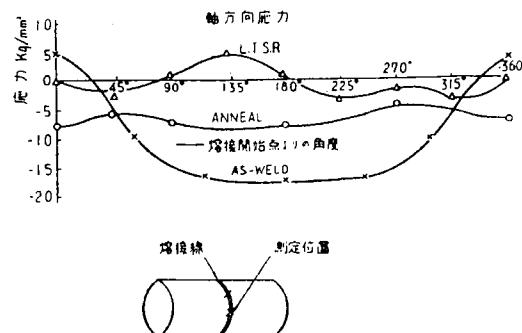


第 13 図 円筒試験片の加熱方法

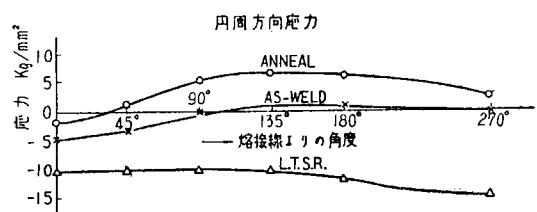
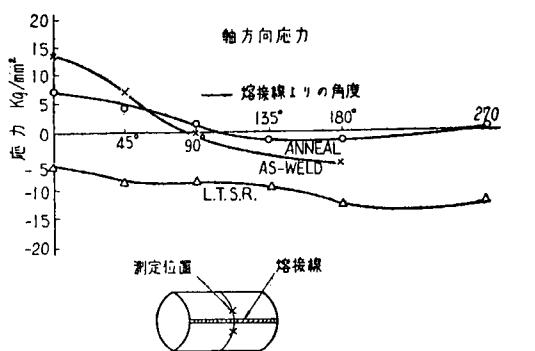
次に本法を応力分布の割合に定まつたもの（構造が割合簡単で）に適用してみる目的を以て、径 200 m/m, 厚さ 7 m/m のパイプを突合せ熔接した場合及び実験のため、わざわざシーム開先をとり熔接したもののが残留応力を電気抵抗線歪計を用い切断法により測定した。この結果より判定して前記の如き本法の機構を活かすために衝合接手の場合には接手部を中心含めて約 100 m/m 巾, 120°C で



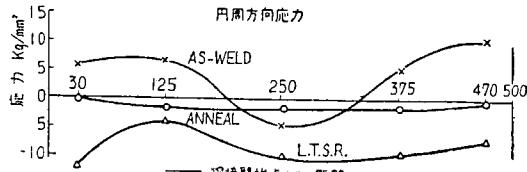
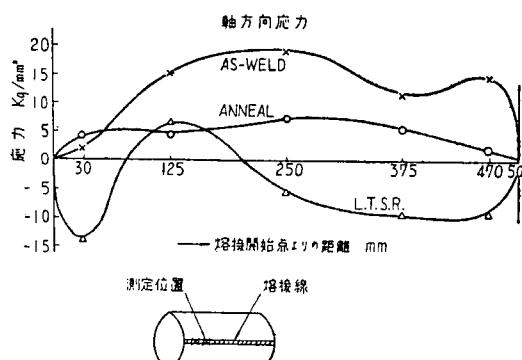
(a) 円周突合せ管の母線上の応力分布



(b) 円周突合せ管の熔接線上の応力分布



(c) 軸方向突合せ管の円周上の応力分布



(d) 軸方向突合せ管の熔接線上の応力分布

第 14 図 熔接円筒の残留応力

処理し、シーム溶接の場合は第 13 図の位置においておののおの約 100 m/m 巾, 220°C の温度で加熱水冷した。装置の一部を写真 1 に示す。これらの結果は第 14 図に示された如くである。なお比較のため 650°C 30 分間パイプ全体を応力焼鈍した結果も図中に示してある。

これらの結果をみても本法は残留応力分布の特性を考慮して適切なる処理を行えば応力焼鈍に匹敵する程の応力緩和が可能なることが知られる。

### I-5 ピーニングに関する研究

ピーニングによって溶接部近傍の残留応力のピークがかなり減少し得ることは古くから知られているが、定性的な範囲に止まり、これを定量化することは困難である。その

一つの理由は残留応力の測定の困難さにあり、米国におけるピーニングの実験並びに日本において行われたいくつかの実験等はそれぞれ互に相容れないような結果が得られている。そのためここでは同一の測定点に対して 3 種類の残留応力測定法を適用し、実験結果の信頼度の向上をはかつた。各種のピーニングを行つた試験片に対しそれぞれ残留応力を測定した後、低温脆性に及ぼすピーニングの影響を求めるためにオーストリア試験を行いその結果を比較した。

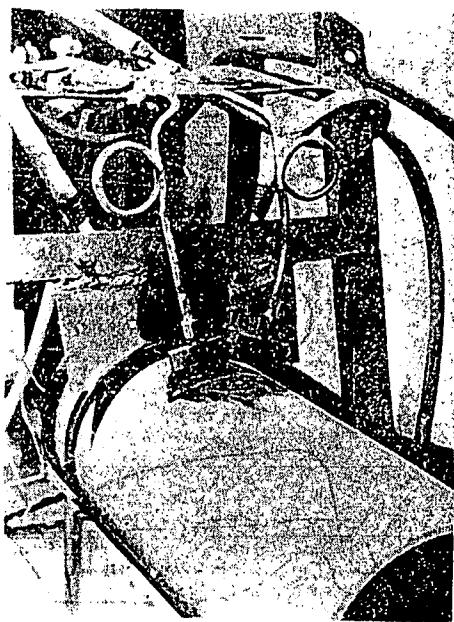
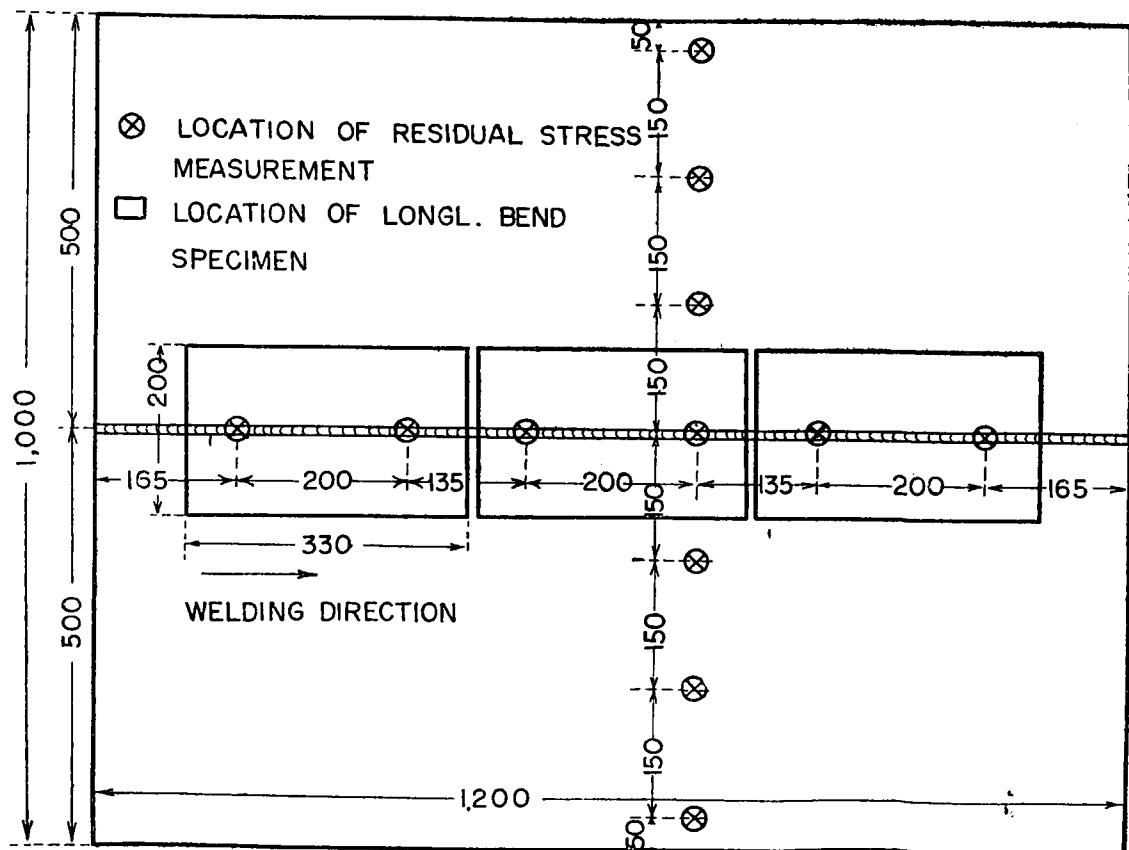


写真 1 低温応力除去装置



第 15 図 ピーニング試験片

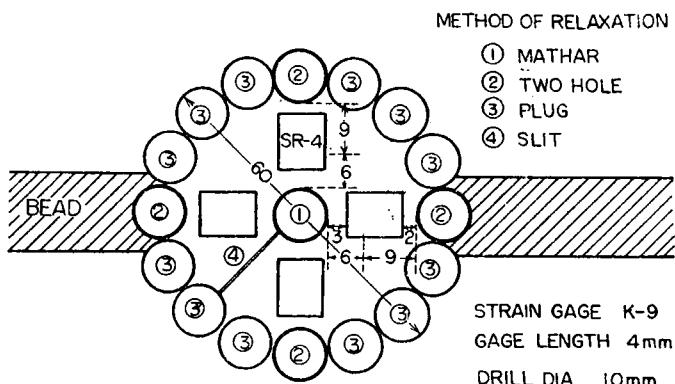
試験片は  $1,200 \times 500 \times 19\text{mm}$  の鋼板を 2 枚突合熔接したものであつて、開先は対称 X 型とし、表裏各 6 層で熔接を行つた（第 15 図参照）。ピーニングの条件を種々にかえ、次の条件のものを作製した。

熔接のまま

熱間ピーニング（ $2''$  ストローク 各層）

冷間ピーニング  $\left. \begin{array}{l} 2'' \text{ トローケ 各層} \\ 3'' \text{ ストローク 各層} \\ 2'' \text{ ストローク 最終層のみ} \end{array} \right\}$

残留応力の測定にはマタール法、二円孔法及び切抜法の 3 者を用いた。測定位置は第 15 図に示す如くである。残留応力測定点の詳細は第 16 図の如くで、真中のマタール法の孔に対して対称に 4 方向の歪を抵抗線歪計で測定した。

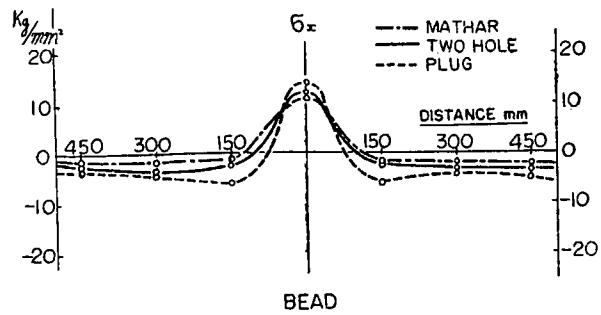


第 16 図 残留応力測定法

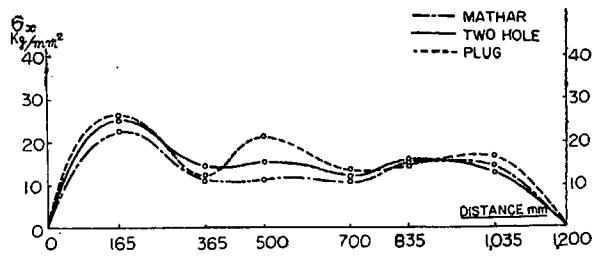
使用したゲージは K-9（ゲージ長 4 mm）で測定は次のようにして行つた。すなわち先づ第 16 図の ① で示す円孔（直径 10 mm）をあける。その時の歪計の変化から初期に残留していた応力の推定を行うのがマタール法である。次に図の ② で示す 4 つの円孔（直径 10 mm）をあければ更に応力が解放されるので、これよりも残留応力の値を推定することができる。これをここで 2 円孔法と名付ける。また図の ③ で示す円孔（直径 10 mm）をあければ外径 40 mm の円輪を切出すことができる。またさらに ④ で示すスリットを切るとこの部分での応力は完全に解放される。よつてこれら 4 つの段階において解放される歪を測定し、それぞれの場合の較正曲線から応力を算定した。

残留応力測定値の詳細は省略するが、実験結果の数例を第 17 図に示す。この図では試験片 1（冷間ピーニング各層  $2''$  ストローク）及び試験片 4（熔接のまま）について熔接線方向応力の熔接上及びこれと直角な線上での分布を示している。図から明らかなごとくビード方向の応力はビード上では高い引張り応力で、両側の板の部分では圧縮応力となり遠方では漸次 0 に近づく。熔接線上での応力分布はかなり凸凹しており、両端では 0 となる。応力測定結果はマタール法、2 円孔法、切抜法によつて多少異なるが、図から分るごとくその差は平均  $\pm 3\text{ kg/mm}$  程度であつた。

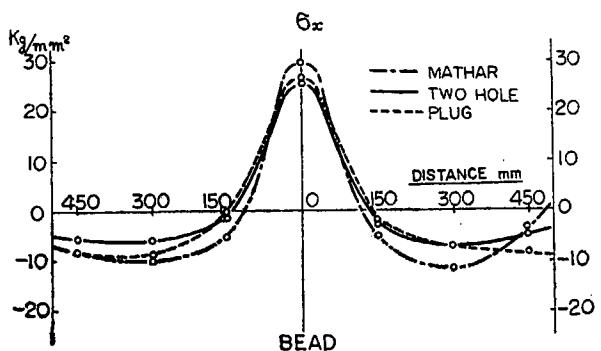
残留応力の値は施工法によつて異なるが、熔接線上にある 6 点の測定点における縦方向応力の平均値を示すと第 3 表の如くで熱間ピーニング及び  $3''$  ストロークの冷間ピーニングの場合ではあまり残留応力は軽減しておらず、 $2''$  各層及び  $2''$  最終層の場合には応力がかなり減少している。



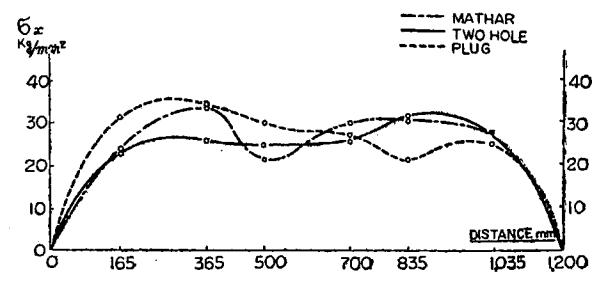
(a) 試験片 No. 1,  $\sigma_x$  の横方向の分布



(b) 試験片 No. 1,  $\sigma_x$  の縦方向の分布



(c) 試験片 No. 4,  $\sigma_x$  の横方向の分布



(d) 試験片 No. 4,  $\sigma_x$  の縦方向の分布

第 17 図 残留応力 (熔接線方向の応力  $\sigma_x$ ) の分布

第 3 表 実 験 結 果

試験片番号	実験条件	縦方向の平均残留応力* (kg/mm <sup>2</sup> )	曲げ試験結果			
			番号	温度(°C)	最大荷重(ton)	破断様式
No. 1	2" ストローク 各層, 冷間ピーニング	16	1.1	-73	—	破断せず
			1.2	-64	—	"
			1.3	-73	—	"
No. 2	3" ストローク 各層, 冷間ピーニング	34	2.1	-73	27.8	破断せず
			2.2	-63.4	13.0	100% Brittle
			2.3	-74	—	"
No. 3	2" ストローク 最終層冷間ピーニング	12	3.1	-68	—	破断せず
			3.2	-71	—	"
			3.3	-64	—	"
No. 4	熔接のまま	28	4.1	-74	—	破断せず
			4.2	-65	—	"
			4.3	-72	—	"
No. 5	2" ストローク 各層, 熱間ピーニング	22	5.1	-73	13.0	100% Brittle
			5.2	-65	13.0	"
			5.3	-70	13.0	"

\* ビード上 6 点における残留応力 (熔接線方向) の平均値

次にこれらの試験片に関してオーストリヤ型の縦曲げ試験を行つた。試験片の寸法は第 15 図に示す如く、長さ 330 mm, 巾 200 mm とした。ローラーの直径、スパン等は標準のオーストリヤ試験に則つたが、曲げ試験を行う温度は -65 ~ -70°C とした。

その結果も同じく第 3 表に示す。表からわかるように as weld, 2 時各層並に 2 時最終層ピーニングをしたものではそれぞれ 3 枚の試験片とも 120° 以上曲つたのに対し、hot peening と 3 時各層冷間ピーニングをしたものでは 100% 脆性破壊を示した。破壊したものの最大荷重は 1 枚を除き 5 枚ともほぼ 13 ton を示しており、断面の熔着部には欠陥はなかつた。

以上の結果をまとめると次の如き結論が下せる。

- 1) peening による残留応力軽減には 2 時ストロークの最終層冷間 peening でも十分効果がある。
- 2) hot peening は材質的に悪影響を与えるので現場で施工することは不適当である。
- 3) ロンチ応力は適當な peening により 30 乃至 35 kg/mm<sup>2</sup> から約 12 kg/mm<sup>2</sup> まで減少する。
- 4) peening はトランス応力をも若干減少せしめる。

これらの実験結果において残留応力の軽減、脆性破壊の両方からいつた hot peening があまりよくないのは、ピーニングした後にまた冷却することによつて新しい残留応力が発生するためと思われる。3 時各層冷間ピーニングが残留応力軽減からもまたオーストリヤ試験の成績からも悪いものは意外で、過度のピーニングによるものか或は他の理由によるかは更に詳細な研究を行つてからでなくては断定できない。

## II 自動熔接の実用化に関する研究

### II-1 自動熔接機の性能調査

造船工業において使用する自動熔接機としては如何なるものを選ぶのが妥当であるかということは自動熔接の実用上重要な問題である。この場合、当然熔接方法、使用する機械等全般に亘つての検討が必要であるが、特に熔接機それ自体の性能の比較は従来殆んど行われたことがなかつたので、本研究ではこの点に重点をおいて実施した。

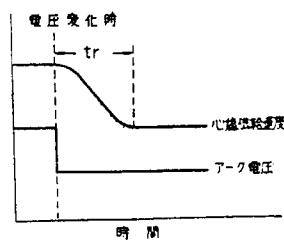
自動熔接機としてサブマージドアーク熔接法に属するものとしてリンデ・ユニオンメルト熔接機、DS 及び UE type、リンカーン熔接機（以上何れも米国製）、ビジブルアーク熔接機としてフェーズアーカ熔接機（英國製）、ブラウンボベリー “Uni” 自動熔接機（スイス製）、以上 5 台の機械について性能の比較を行つた。自動熔接機の性能としては心線供給速度の自動制禦装置及び各電気部品の性質等を含む電気的性能、熔接頭及び台車の構造、機構及び材質等の機械的性能、更に熔接前の準備、熔接中の操作等実際に機械を操作する上の性能の以上 3 点に大別して考えられる。最後の操作性能については電気的、機械的性能と重複する点も多いが自動熔接の歴史が新しい現在ではこのようなことが案外重要と思われる所以別個に採り上げてみた。これらの性能を調査するに當つて主要な心線供給機構については実験により特性曲線を求め、他の電気的、機械的及び操作性能についてはアンケート形式の調査により各機械の比較を行つた。調査の結果は以下に述べる如きものである。

#### 1) 心線供給の制禦特性

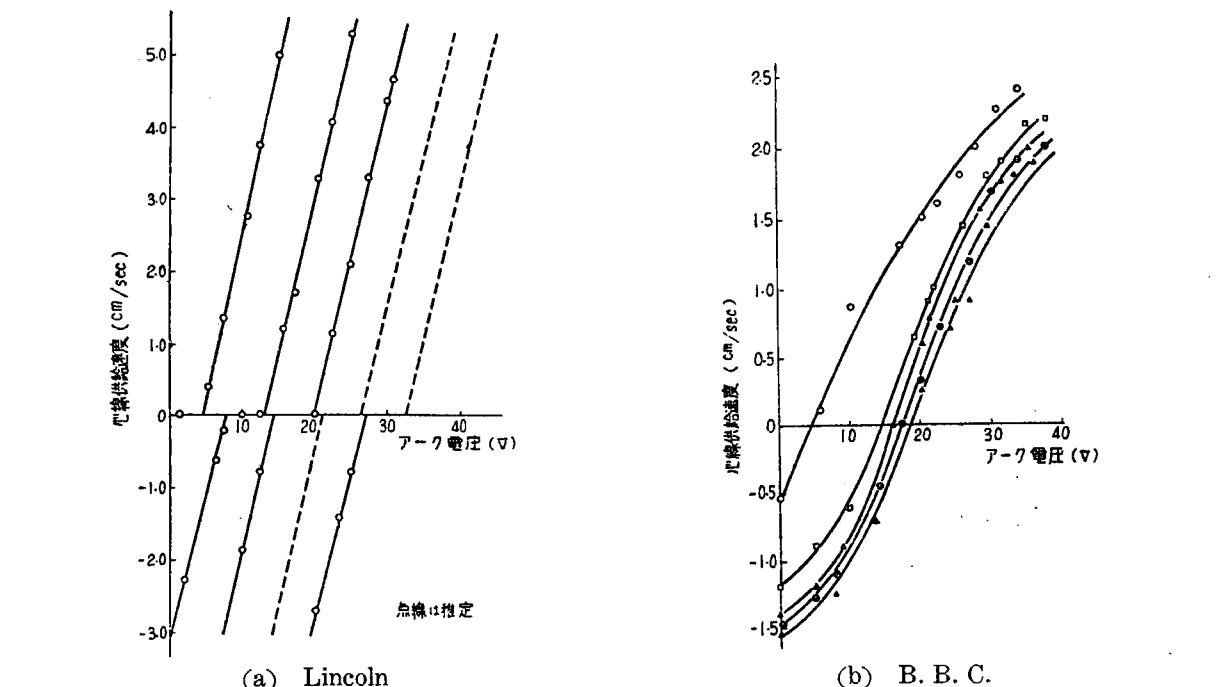
自動熔接機として最も重要な部分はアーク電圧に応じた心線供給速度の自動制禦である。この制禦

特性として具備すべき点は先ずアーク電圧の変化に対する心線供給速度の変化率の大きいこと、すなわち静的感度が鋭敏であることであり、次にはアーク長が変化した場合もとのアーク長に復帰する時間の短いこと、すなわち動的即応性の速いことである。従つて実験もこの2点について行つた。ただし負荷としてはアーク負荷の代りにスライダックにより電圧を与える、これを変化させた場合の供給速度（送棒モータの回転数を発電機型回転計により測定しこれを供給速度に換算する）を測定し静特性（静的感度）を求めた。また同様な方法で与えたアーク電圧に相当する電圧を一定に保つて定速度でモータを回転させ、この状態から電圧を第18図の如く急激に変化させ、回転数が変化後の電圧に応じた回転数に落着く状況をオシログラフで観察し、これに要する時間（tr）から動特性（動的即応性）の比較を行つた。

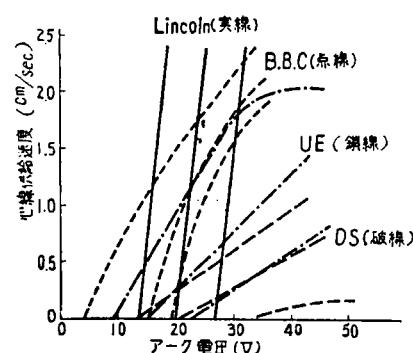
(i) 各静特性機械について求めた静特性曲線を第19図に示す。また第20図は各機械の比較を



第18図 動的即応性



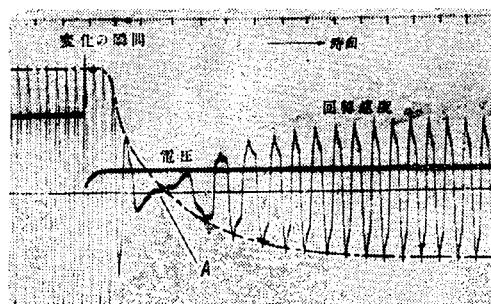
第19図 静 特 性 曲 線



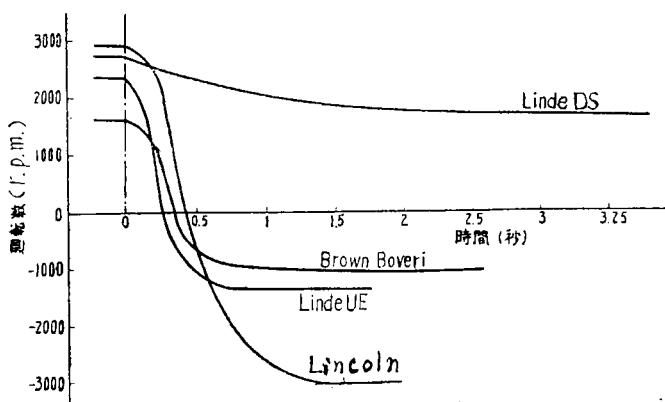
第20図 各機械の静特性曲線の比較

行うためにその代表的なものをとりまとめた結果である。自動熔接機は与えられた熔接条件に応じてある範囲の供給速度がえられるようになっているので、静特性をしらべるに当つてはこの範囲内で電圧調節のダイヤルにより数段の基準速度をとり、それぞれの場合について負荷電圧を変化させた際の速度変化を求めた。従つて1台の機械について数本の特性曲線がえられる。この場合特性曲線の傾斜の大なる方がすぐれているわけである。

これらの結果によると感度は Lincoln, B. B. C., UE, DS の順となつておる、特に Lincoln は特性が linear でアーケ電圧が変つても感度は一定であり、また調節ダイヤルの位置を変えててもやはり感度は変らず最も優秀な成績を示している。この点 UE が感度は左程悪くないが、ダイヤルの調節によつて感度が相当異りあまり面白くない特性を示しているのは対蹠的である。以上4種の機械は同じような傾向を示しているが Fusarc のみは制御方式が全く異なるため特性曲線の性質が変つてきておる。すなわち Fusarc ではアーケ電圧の変化に応じて連続的に供給速度を変える方法をとらず、リレーを用いてあるアーケ電圧以下に下るとモーターの回転を停止し、更に下がればモーターは逆転する。従つてアーケは次第に伸び旧のアーケ電圧に帰れば再びリレーが作動しモーターは回転を始めるようになつておる。アーケが逆に伸びて電圧が高くなる場合はモーターの回転数は一定である。このような方法をとつておるため特性曲線は第 19 (e) 図に示す如き形を示し制御方式としては単純なものといえよう。この場合にはリレーの感度が問題となるが、相當鋭敏なものを使用しているので実際の作業には支障はないようである。



第21図 オシログラムの例 (B. B. C.)



第22図 各機械の動特性曲線の比較

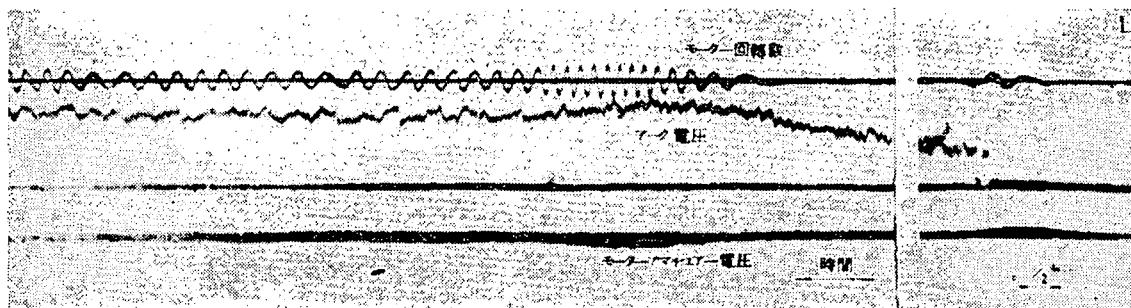
(ii) 動 特 性

各機械の動特性を示すオシログラムの例を第 21 図に示す。この図は B. B. C. 熔接機についてアーケ電圧を 65V から 16.5V に急に落した場合を示しておるが、回転数が 1,520 r.p.m. から -980 r.p.m. (逆転) に変化するのに約 2.5 秒を要している。

各熔接機に関するオシログラムを整理した結果を第 22 図に示しておる。この場合機械によつて電圧降下の条件などに多少の相違もあるので、細かい定量的な比較は行えないが順位だけは認められるようで UE が最も優れ、 Lincoln, B. B. C. DS の順となつておる。

次に上に述べた静特性、動特性と関連を有するものとして実際の溶接を行うときの起動時の特性が考えられる。が各機械についてこの特性を比較することは条件を揃えることが一層難しいと思われる所以、参考程度に静特性及び動特性の比較的優れている Lincoln 機について調べてみた。第 23 図が起動時の状況を示すオシログラムで 600 Amp. 28 V の溶接を行い、アーカ発生後約 4 秒までのアーカ電圧及び回転数の変化が示されている。この図によるとアーカ電圧に応じて回転数がよくフォローしており、静特性の優秀なことを裏書きしている。

なお Fusarc については制御方式が異なるため、この比較からは除外している。



第 23 図 起動時のオシログラム (Lincoln)

## 2) アンケートによる調査

電気的性能、機械的性能及び使用性能について種々な項目にわたり、アンケート形式の調査を行つた。これは 2, 3 の使用者について実施したが、ここではその詳細な結果は省略し集つた資料を参考に長所及び欠点をとりまとめた結果のみを示すこととした。(第 4 表)

第 4 表 各機械の使用性能比較

機械名	長 所	欠 缺	総 合
UE	機械の操作は最も容易で各種部品の寿命も長い。	起動時にスティールワールを要する	良
DS	軽便のため扱い易い。	オートトランス等電気部品に比較的故障。	普通
Lincoln	構造が頑健でスタートの操作が極めて容易。	溶接中電圧、電流の調節が手許で行えない。	普通
B.B.C.	電気部品の性能は最も優秀でアーカの発生が容易。	機械の操作が便利とは言えない。	普通
Fusarc	極めて頑健で且つ可視アーカのため溶接中の調節が容易。	機械重量余りに大きく可搬性が劣り又リレーの故障多し。	普通

調査の結果先づ感ぜられることは何れの機械も制御方法等には相当苦心を払つているが、その割に使用条件に適した設計という面に対してはおろそかであり、このため操作が容易でなくなる点が多い。各機械の比較になるといずれの機械も長短相半ばし優劣はつけ難いが、ただ UE 機のみは他機を押し全般的に良好と称して差支えないようである。

以上今回の調査を総合すると、

電気的な面では直流を用いる B. B. C., Lincoln が制御特性その他で優れ、直流のアーカを用いることと相俟つて安定した溶接、容易な起動を行うことが可能である。交流機でも UE は起動時にスティールワールを用いる難点はあるが、まづ前者と同様と考えてよい。なおいづれの機械も普通の溶

接を行う上には十分な制禦能力を有しており、ただ弱い電流を用いるような特殊な用途に用いる場合のみその差が認められるに過ぎない。その他構造、機構あるいは使用性といつた面では UE が優れている以外は甲乙がつけ難い。操作性能について附言したいことは屋内作業と屋外作業では多少要求が異なることで、上記機械の中にもこの意味から適不適が認められ、B.B.C. 機は屋内に、Lincoln 機は屋外に向くようである。この種の傾向はむしろ好ましいことであり、万能機よりは多少特色を持っている方がかえつて使い易い。ここでは調査の都合上国産機に触れていないが大阪変圧器 SW 3 A 機は Linde, UE 機に近いものと考えられる。

## II-2 サルファークラック防止法の研究

自動溶接の実用化に際してはサルファークラックの発生を防止することが必要である。本問題については運輸省船舶局内の自動溶接実用化促進委員会および溶接協会の自動溶接研究委員会とが協力してかねてより研究が行われているが、同委員会では実用に供せられている溶剤および心線を使用した場合の鋼材の品質と溶接条件とがサルファークラックの発生状況に及ぼす影響を検討することに主眼点が置かれていた。したがつてサルファークラックと通称されている熔着鋼内亀裂の発生原因、あるいはサルファークラックが接手の強度に及ぼす影響については研究が行われていないので、ここではこの 2 者の検討をおもに行つた。また溶剤そのものの研究は次項において実施した。本研究の内容は下記の如くである。

### 1) 亀裂発生原因の研究

自動溶接をリムド鋼に使用すると屢々サルファークラックと称する熔着鋼内割れを生ずる。この概



況は第 24 図の如くで、母材の偏析部すなわちゴーストラインからスタートし、熔着金属の柱状晶に沿つて進行している。従つて硫黄含有量の多い鋼板では概して発生が著しいが、同種の硫黄を含む場合でも

第 24 図 サルファークラック

これが一様に分布しているときには発生せず、一局部に濃厚に偏析している際に発生するものである。また硫黄の偏析がかなり濃厚でも亀裂を生じないこともあるが、これは同じ硫黄の偏析でもその状態が異なるからと考えられる。例えば S が MnS, FeS のうちの如何なる状態にあるか、この両者の混合比が如何になっているか、あるいはまた FeS や MnO の存在がいかに異っているかなど複雑な影響がある。本研究はこれらの問題についての検討を主眼点にして実施されたものである。

そのため使用鋼板としてはリムド鋼 2 種、セミキルド鋼及びキルド鋼各 1 種の合計 4 種類を用い、これにユニオンメルト溶接を行つた。鋼材の化学成分、心線及び溶剤の組成、溶接条件をそれぞれ第 5~7 表に示す。

溶接後これらの試験片についてマクロ試験を行つて亀裂の有無ならびに発生状況を調査すると共にサルファープリントによつて硫黄の偏析状況をしらべた。結果の詳細はここでは省略するが、その概要は第 7 表にも示したように、亀裂はリムド鋼に多いが、セミキルド鋼、キルド鋼にも出ることがあつた。

次に溶接割れを起した部分及び母材の偏析部を顕微鏡により検討した。

第5表 試験用鋼板の種類と成分

記号	鋼板の厚さ (mm)	鋼塊の種別	化学分析(%)				
			C	Si	Mn	P	S
L <sub>1</sub>	12	リムド(偏析多し)	0.15	0.039	0.46	0.087	0.040
L <sub>2</sub>	14	リムド(偏析少し)	0.07	0.040	0.32	0.10	0.024
SK	25	セミキルド	0.16	0.031	0.37	0.074	0.022
K	30	キルド	0.15	0.016	0.37	0.071	0.021

第6表 心線と溶剤の成分

心線: Oxfeld No. 36

組成	C	Si	Mn	P	S
含有量(%)	0.15	0.10	1.75	0.021	0.022

溶剤: Grade 20

組成	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
含有量(%)	53.52	0.30	1.03	31.32	9.18	3.81	0.20	0.40	0.24

第7表 熔接条件

記号	板厚 (mm)	熔接条件				備考
		パス	電流 (Amp)	電圧 (Volt)	熔接速度 (in/min)	
L <sub>11</sub>	12	1	550	30	18	偏析あり、硫黄のghost line著しい。割れを生じた所あり
		2	650	30	16	
L <sub>12</sub>	12	1	550	30	18	
		2	700	30	20	
L <sub>21</sub>	14	1	650	30	18	硫黄偏析部より割れを生ず。
		2	700	32	18	
L <sub>22</sub>	14	1	650	30	18	
		2	800	35	20	
SK <sub>1</sub>	25	1	850	33	14	熔着部デンドライト粒界に沿つて割れが入る。
		2	850	35	14	
SK <sub>2</sub>	25	1	850	33	14	
		2	1,000	38	14	
K <sub>1</sub>	30	1	900	35	14	小さい割れあり。
		2	1,050	36	14	
K <sub>2</sub>	30	1	900	35	14	
		2	1,200	40	14	

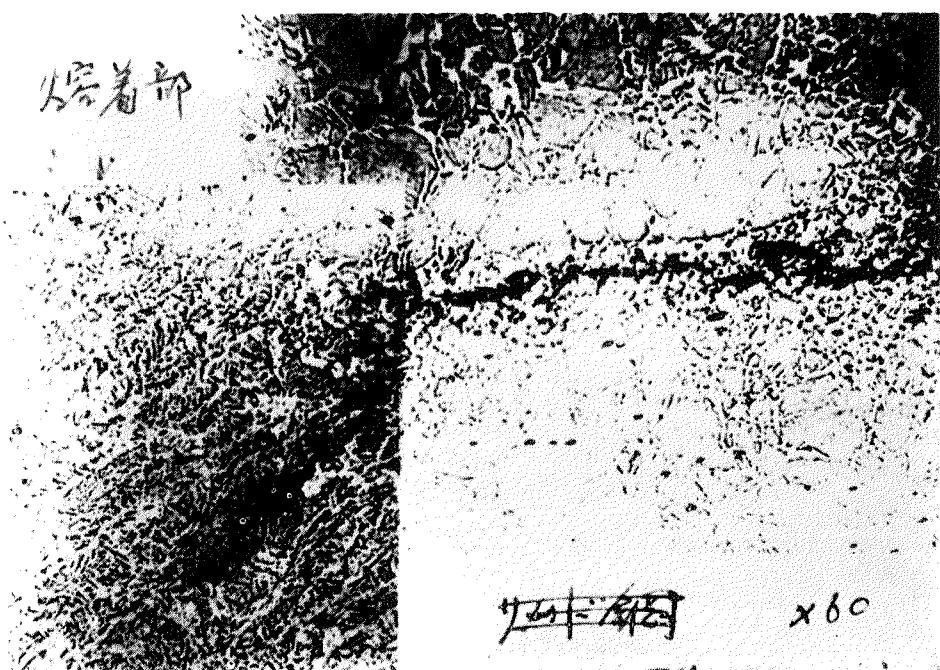


写真2 リムド鋼の熔接割れ  
×60

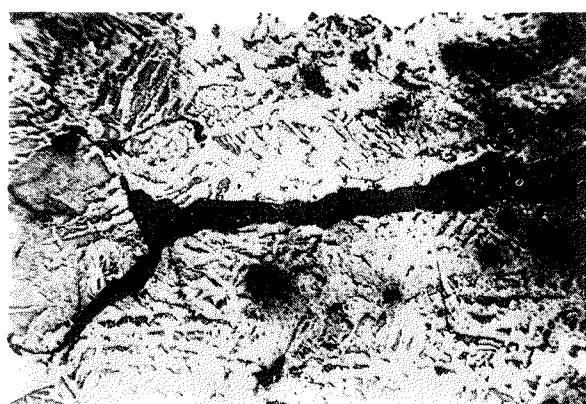
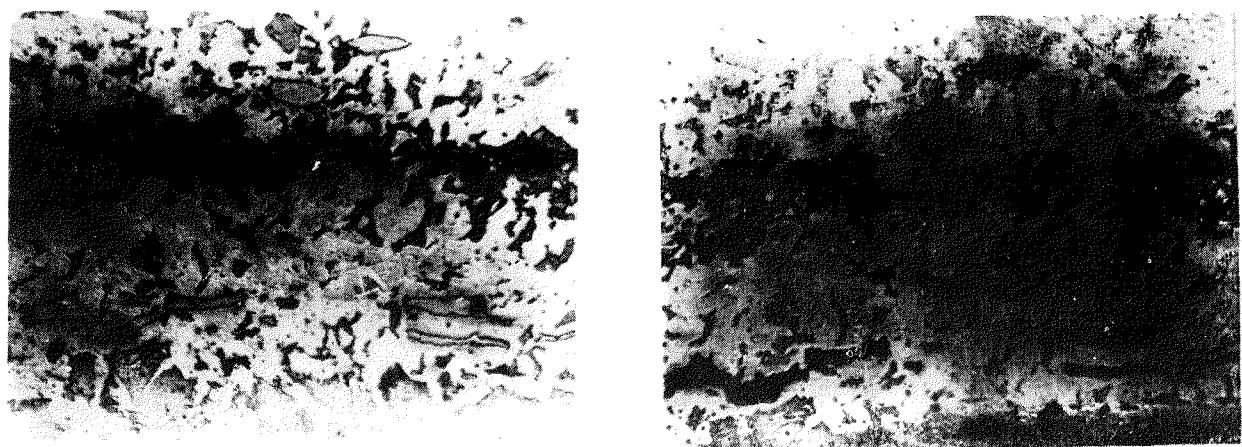


写真3 熔接割れの組織  
×200



(a) ピクリン酸アルコール溶液腐蝕  
×200  
(b) 7% クロム酸水溶液腐蝕  
×200

写真4

写真2はリムド鋼で割れを生じた母材部の組織である。母材は過熱され粗大結晶粒となつてゐる。写真3は熔接割れが粒界に沿つて進んでいることをよく示している。なお割れの中には酸化物ができている。写真4はセミキルド鋼の母材ゴーストライン中に生じた熔接割れの写真であるが、色の異つた種々の介在物が存在する。これら各種介在物の組成を知るには単にその色の差異だけでなく化学薬品に対する腐蝕度の差によつて一層確実に区別することができる。その色が黄乃至黄褐色系のものは主として FeS または FeS に富む硫化物であるが、灰色系の介在物には FeO, MnO, Silicate 等の酸化物の他 MnS に富む硫化物もある。これを区別するには、クロム酸水溶液で腐蝕すると MnS に富む硫化物は強く腐蝕されるが、酸化物は僅かしか侵されない。

写真4 (a) はピクリン酸アルコール溶液で腐蝕した写真だが、上部の楕円形の介在物は灰色だが下部の角張つたものは黄色である。これは FeS に富む硫化物であることはその色だけで判る。割れ内部の介在物は多少色の異つたものもあるが、大体灰色である。この試料を 7% クロム酸溶液で腐蝕したもののが写真4 (b) で、上部の楕円形の介在物は完全に溶解しており MnS を主体とした硫化物であることがわかる。下部の介在物は FeS であるからわづかに黒変しただけである。

割れ内部の介在物は一部溶解し大部分は色が黒変しただけで残つており、酸化物が相当含まれていることを示している。写真5は高倍率の写真を示したが、クロム酸腐蝕後の状態がよくわかる。

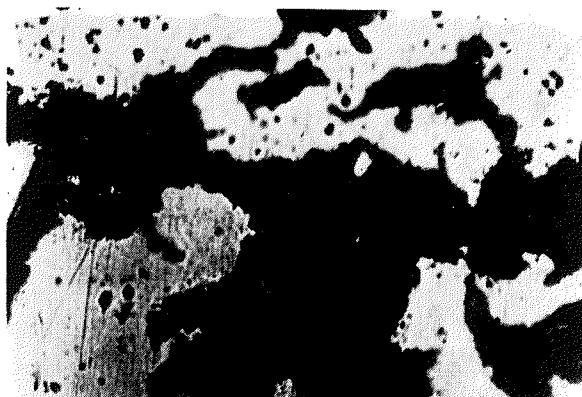


写真5 7% クロム酸水溶液腐蝕  
×600

これらの結果を総合すると、サルファークラックは母材中の濃厚な偏析部から始まり、熔着鋼のデンドライトの粒界に沿つて成長しており、その意味では硫黄の偏析と密接なる関係があるが、さらに亀裂部の組織の詳細を検討すると FeO, MnO, Silicate 等の酸化物あるいは MnS に富む硫化物など種々の介在物が認められる。従つてサルファークラックの発生防止に関しては単なる偏析のみではなく、硫化物の組成及び酸化物の量について考えておく必要がある。

## 2) サルファークラックが接手の強度に及ぼす影響

サルファークラックが接手の強度に及ぼす影響についてはこの亀裂が微小な場合は静的な引張り、曲げ等に関しては完全な接手と殆んど変わらないので、最も影響をうけやすいと思われる疲労試験を行つた。

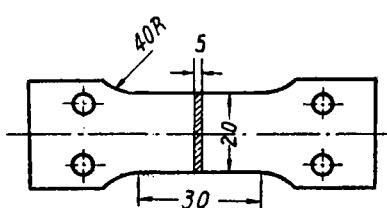
第8表 熔接条件

熔接機	Unionmelt UE-37 Portable Welding Machine
心線	Oxweld No. 36
溶剤	Grade 20
電流	B. P. 850 A, F. P. 650 A
電圧	33V
速度	B. P. 20 in/min, F. P. 22 in/min
棒径	B. P. $\frac{1}{4}$ in, F. P. $\frac{3}{16}$ in

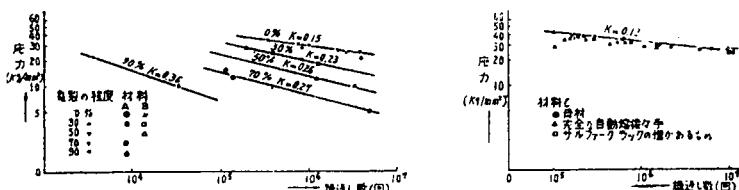
(註) B. P.: Backing Pass, F. P.: Finishing Pass

第9表 使用材料の化学成分

	C	Si	Mn	P	S
A	0.33	0.009	0.39	0.024	0.032
B	0.21	0.039	0.35	0.039	0.037
C	0.16	0.029	0.45	0.011	0.029



第25図 試験片

(a) A, B 材 (b) C 材  
第26図 疲労強度に及ぼすサルファークラックの影響

今回の実験は繰返し曲げであるため、細い亀裂を内部に有するものについては亀裂附近の応力が低く、パルセーターで試験するのが望ましいが設備の関係で行えなかつた。然し、肉眼で見えない程度のものならば恐らくどんな試験法によつても問題にならないものと推定される。

### II-3 自動溶接用溶剤に関する研究

従来は主として市販溶剤について比較研究を行うに止まつていたが、今回は化学成分を系統的に変化させ溶剤の成分とサルファークラックとの関連を求めた。その概要は次の如くである。

(1) 先ず市販潜弧溶接用剤の化学組成及び塩基度を調べた。そして主成分  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$  について、 $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2\text{-CaO-MnO}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  及び  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  各3元系平衡状態の上に組成点を求めてみた。その結果、市販溶剤は  $\text{MnO}$

熔接条件を第8表、使用材料の化学成分を第9表に示す。このうち、A, B は初期のリムド鋼で硫黄の偏析が多く、C は最近の良いリムド鋼である。これらの板より試験片(第25図)を切出し、シェンク繰返し曲げ試験機により疲労試験を行つた。

A, B は悪い例として各 15 枚の試験片をとつた。亀裂が表面まで達しているものが大部分であつたが、均一でないため亀裂の深さの板厚に対する割合で分類し、縦軸に応力、横軸に繰返数を何れも対数をとつて整理すると第26図の如くになる。このように甚しい亀裂がある場合は疲労強度は著しく下り、接手として実用に供されない場合も多いと考えられる。

Cの板については母材、完全な接手及び肉眼で分らない程度の細いサルファークラックを内部に含むものとの3種について同様の試験を行い、第3図の如き結果を得た。この程度の亀裂ならば繰返し曲げに関する限り母材や完全な溶接々手に比し何ら遜色がないと考えられる。

を多く含むもの以外は、 $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$  及び  $\text{SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$  各系における融点  $1,500^\circ\text{C}$  以下の共晶点或は包晶点に近い組成を有し、且つ酸性熔剤が大部分であることが判つた。

(2) そこで  $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MnO}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 、 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$  及び  $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  系において、融点  $1,500^\circ\text{C}$  以下と思われる共晶点または包晶点附近の組成の熔剤をエルー式電弧炉で熔製した。また  $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$  系に  $\text{MnO}$  または  $\text{FeO-TiO}_2$  を加えたものをも熔製した。これ等を粉碎した後、磁気選別により鉄分を除き、粒度を  $20\sim80$  メッシュに篩別した後実験用熔剤とした。

(3) 上述せる熔製溶剤の中より 44 種類を選び、 $\text{Mn}$  をそれぞれ  $0.58\%$ 、 $1.41\%$  及び  $1.94\%$  含有する軟鋼心線 3 種を用いて、厚さ  $6\text{ mm}$  の軟鋼板上に、電流  $500\text{ A}$ 、電圧  $30\sim35\text{ V}$ 、ビード進行速度  $600\text{ mm/min}$  で一層ビードを置いた。この際の熔接性、スラッグの剥脱性及びビード外観等の良否を検討し、且各系毎に酸性及び塩基性の溶剤を可能な範囲で 1 種づつとり、19 種類の溶剤を選定した。

(4) これらの溶剤及び上記 3 種の軟鋼心線を用い、V 溝を切った厚  $25\text{ mm}$  の造船用軟鋼板の上に、電流  $750\text{ A}$ 、電圧  $35\sim40\text{ V}$ 、ビード進行速度  $314\text{ mm/min}$  で一層ビードを置いた。然る後、試片をビード方向に直角に  $15\text{ mm}$  間隔に切断し、切断面を研磨し、マクロ腐蝕した後肉眼で熔着部を観察し、また顕微鏡組織を検査した。

その結果、 $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 、 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  及び  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$  各系の溶剤を用いた場合に熔着鋼内割れの発生が多く、 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MnO}$  及び  $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$  系を用いた場合には割れの発生が著しく少いことが判つた。

(5) 次にビードに直角方向から引張試片を採取した。この場合平行部が完全に熔着金属より成るようにした。そして抗張力及び断面収縮率を測定した。またビードに直角方向のシャルピー衝撃試片を採取した。ノッチ部分が完全に熔着金属より成るようにし、衝撃値を測定した。

その結果、 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$  系酸性溶剤と  $\text{Mg} 1.94\%$  含有軟鋼心線の組合せ、及び同系塩基性溶剤と  $\text{Mn} 1.41\%$  及び  $1.94\%$  含有軟鋼心線の組合せを用いた場合、機械的性質の最も良好な熔着金属が得られた。(抗張力  $55\text{ kg/mm}^2$  以上、断面収縮率  $50\%$  以上、シャルピーより衝撃値  $9\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$  以上)、また熔着鋼内割れが発生していた試片より採つた引張試片は割れの個所より破断し、その面は無色或は着色した柱状破面を呈していた。

(6) 第(4)項に述べた如く、熔着鋼内割れの発生には、使用した溶剤の組成系が最も顕著に影響を及ぼす、就中溶剤成分として  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を多く含有する場合(約  $10\%$  以上)に割れの発生傾向が著しかつた。割れが発生した熔着鋼及び割れが発生しなかつた熔着鋼の母材隣接部を顕微鏡で検査したところ、割れの発生した熔着鋼内には非金属介在物が非常に多く存在していた。

(7) 溶剤の塩基度が熔着鋼の脱硫に大いに影響することに冶金学の一般常識から容易に理解できる所である。熔着鋼内割れは母材のサルファーバンドを起点として発生する場合が多く、また硫黄含有量の多い熔着鋼に特に割れの発生が著しい。そこで脱硫作用を期待できる塩基性溶剤を用いれば、直接或は間接に硫黄による熔着鋼内割れを軽減できるものと思われる。本実験においても塩基性の溶

剤を用いた場合に熔着鋼内割れの発生は幾らか少なかつた。

また塩基性の溶剤を用いる場合は、酸性溶剤を用いる場合に比し、母材及び心線中の Mn の消費は少く、溶剤より還元されて熔着鋼中に入る Si 量も少い。従つて前者の場合には熔着鋼の地鉄が良好となり、諸介在物も少くなると考えられるが、本実験において塩基性溶剤を用いて得た熔着鋼の機械的性質が幾分良好であり、且つ割れの発生が少いのはこの理由によるものと思われる。

(8) Mn 0.58%, 1.41% 及び 1.94% を含有する 3 種の軟鋼心線について試験した結果は次の通りである。

- (i) Mn 含量の多い Mn 1.41% 含有軟鋼心線または Mn 1.94% 含有軟鋼心線を用いる場合は、Mn 含量の少い Mn 0.58% 含有軟鋼心線を使用する場合に比し、熔接性が著しく良好である。特に塩基性溶剤を用いる場合この傾向は顕著である。
- (ii) 熔着鋼の機械的性質については、用いた溶剤と心線の組合せが問題となるが、大体において Mn 0.58% 含有軟鋼心線を用いた場合より、Mn 含量の多い他の 2 者を用いた場合の方が良好な結果が得られた。

昭和31年10月15日 印刷  
昭和31年10月20日 発行

**日本造船研究協会報告 第12号**

発行人 出 淵 畿

発行所 社団法人日本造船研究協会

東京都中央区京橋1ノ2  
セントラルビル5階  
電話 (28) 1409

印刷人 笠 井 朝 義

印刷所 笠井出版印刷社

東京都港区芝南佐久間町1~53  
電話 (50) 3649, 3641, 9212