

片状黒鉛鑄鉄の溶接継手強度に及ぼす 予熱温度と溶接棒の影響

下野 功, 菅原 智明, 加賀 寿

Influence of Preheating Temperature and Electrode on Weld Joint Strength of Flake Graphite Cast Iron

Isao Shimono, Tomoaki Sugawara, Hisashi Kaga

要 旨

片状黒鉛鑄鉄の適切な溶接作業条件を見いだす目的で、市販のNi系溶接棒を用いた被覆アーク溶接を行ない、溶接継手強度に及ぼす溶接条件の影響について調べた。実験は溶接継手部のX線検査、強度試験、継手部断面の組織観察、硬さ分布測定、および破断面のSEM観察などを行なった。実験の結果、予熱温度、ビード長、ピーニングなど適切な溶接条件を選定することにより、母材と同程度の継手強度を得ることが可能であることが分かった。

1. 緒 言

鑄鉄は鑄造によって作られる、鉄、炭素、硅素などからなる合金である。鋼と異なる点は、炭素を黒鉛の形で2%以上含有している点である。鑄鉄は複雑な形状の部材を造ることに適していることから、多くの機械・船舶部品に利用されている。特に当地域においては、鑄造部品の割れや欠陥に対する補修溶接の必要性が高い。さらに、分割鑄造と構造溶接によってより複雑な形状の鑄造品を製造することができるならば、その利点はきわめて大きい。しかし、一般に鑄鉄の溶接は鋼に比べて困難であることから、信頼性のある溶接技術は未だ確立されてはいない¹⁾⁻³⁾。これは逆に言えば改善の可能な、あるいは今後発展の余地の大きな技術分野であるということが出来る。

本研究は、現場における鑄鉄の適切な溶接作業条件を見出す目的で、数種類の市販のNi系溶接棒を用いて被覆アーク溶接を行い、特に予熱温度の効果に着目し、溶接継手部の強度に及ぼす溶接条件の影響について検討したので報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材および溶接棒

溶接に供した試料はFC250級の片状黒鉛鑄鉄で、その化学成分を表1に示す。試料は302×250×12mm²の板状となるように砂型鑄造を行ない、その後1093Kで3.6ksの焼鈍を施した。熱処理後の試料の

表1 供試材 (FC250) の化学分析結果

	C	Si	Mn	P	S (mass%)
FC250	3.44	2.27	0.66	0.95	0.81

顕微鏡組織を写真1に示す。基地組織はフェライトとパーライトがほぼ半々に混在した組織で、引張強さは143MPaであった。板状試料を中央で1/2に切断し、X型の開先加工後、被覆アーク溶接により溶接した。

溶接棒には溶接棒A、BおよびCの3種類を用いた。溶接棒AとBはJIS Z 3252相当のNi系DFC_{Ni}で、メーカーが異なる。メーカーの差異によるフラックスの違いを調べる目的で、溶接棒AとBのフラックス

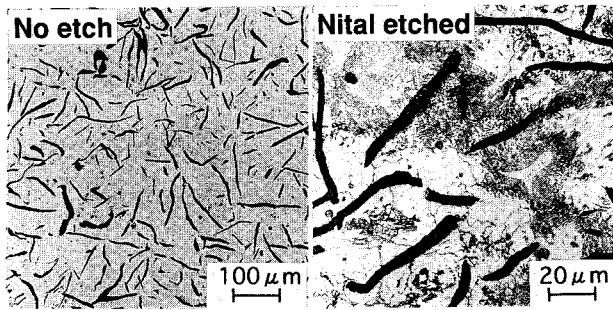


写真1 供試材 (FC250) の組織写真

部分のX線マイクロアナライザー (XMA) による分析を行なった。溶接棒CはNi-Cu系DFC NiCuである。これらの溶接棒はいずれも直径3.2mmであり、そのJIS規格上の化学成分を表2に示す。

表2 溶接棒のJIS規格上の化学成分値

	C	Mn	Si	Ni	Fe	Cu (mass%)
溶接棒 A, B (DFC Ni)	1.8>	1.0>	2.5>	92<	-	-
溶接棒 C (DFC NiCu)	1.7>	2.0>	1.0>	60<	2.5>	25~35

2.2. 溶接方法

開先形状および溶接手順と試験片採取位置を図1に示す。

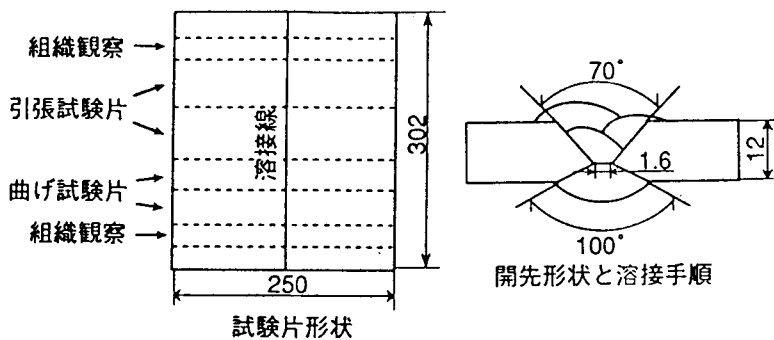


図1 試験片寸法と開先形状および溶接手順 (単位 mm)

溶接は最初表3層、次に裏はつりの後裏1層の溶接で計4層盛りとした。1回のビード長を約50mmとし、直ちにピーニング (先細ハンマによる強打) を施した。電流値はいずれも120Aとした。

溶接条件としては特に予熱保持温度に着目し、373K、473K、523Kおよび573Kの4点の温度を選んだ。予熱はバーナーによる加熱で、温度は表面温度計

で測定し、溶接開始時にこの温度に保持されるよう管理した。検討パラメータ以外の条件が極力同じになるよう作業を実施した。

2.3 溶接継手部の評価

得られた溶接継手部について、まずX線検査を行なった。X線検査は管電圧245KVp、フィルム-線源間距離750mmで、判定はJIS Z 3104によった。

X線検査後、機械加工により厚さ10mmの板とし、図1に示すように試験片を採取した。試験片を加工後、引張試験、曲げ試験、組織観察などに供した。試験片の形状、寸法、および曲げ試験法を図2に示す。曲げ試験では最大荷重点で破断したので、この時の曲げ変位量をたわみとし、また曲げモーメントから曲げ強さを求めた。

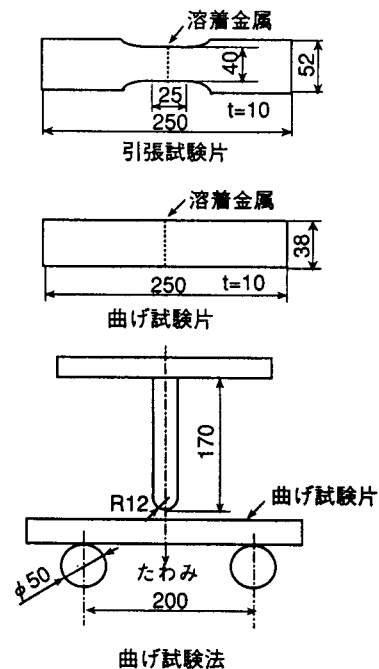


図2 引張試験片形状、曲げ試験片形状および曲げ試験法 (単位 mm)

溶着金属と母材の境界部の硬さ分布をマイクロビッカースにて測定した。また、予熱温度を473Kとした試料の溶着金属と母材の境界部については、XMAによるライン分析も行なった。

引張試験後の試験片については、破断面のSEM観察を行なった。

3. 溶接部の試験結果

3.1. 予熱温度の影響

3.1.1 X線検査

各予熱温度による溶接継手部のX線検査結果を

写真2に示す。いずれにおいてもブローホールが見られ、判定の結果は4級であった。予熱温度373Kでは割れが見らる。ブローホールは、個数、大きさとも予熱温度523Kが最も著しく、473Kの試料の欠陥の程度が最も軽微である。

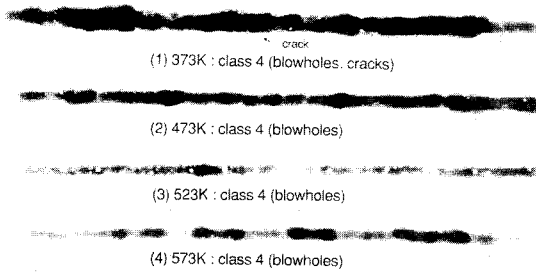


写真2 予熱温度による溶接継手部のX線透過写真

3.1.2 溶接部の金属組織

溶着金属部の断面のマクロ組織写真を写真3に、また熱影響部近傍のミクロ組織写真を写真4に示す。マクロ組織写真からは、いずれの予熱温度でも溶着金属内に複数のブローホールが認められる。また溶着金属と鑄鉄母材の間に、いずれも数mm幅の熱影響部の存在が認められる。写真4からは、予熱温度の最も低い373Kにおいて熱影響部の幅が最も狭いことが分かる。

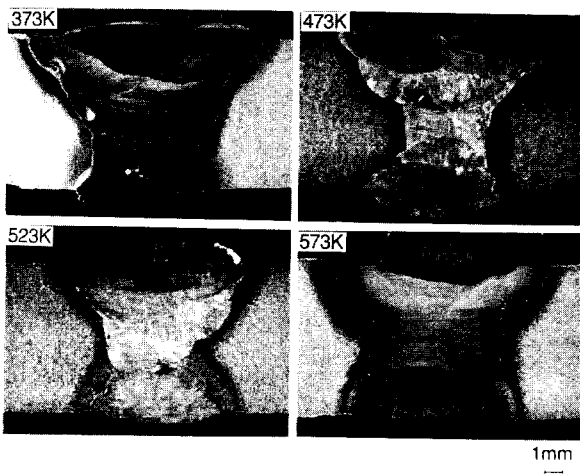


写真3 予熱温度による溶着金属部断面のマクロ組織写真

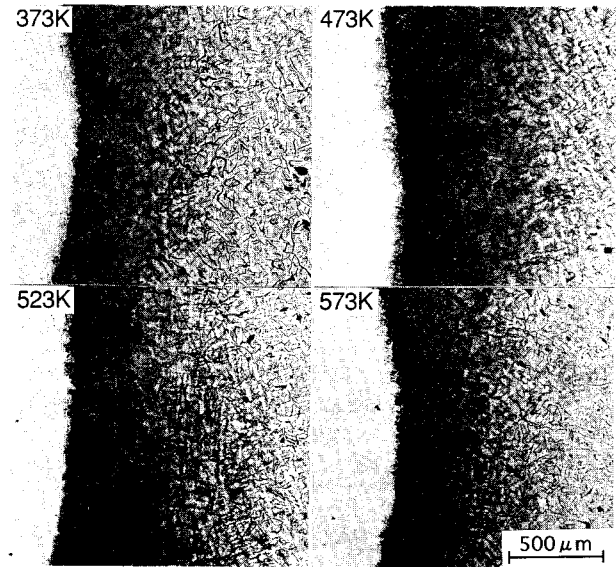


写真4 予熱温度による熱影響部のミクロ組織写真

写真5に予熱温度473Kにて溶接した試料の熱影響部近傍のライン分析結果を示す。溶着金属部ではNi、母材部ではFeが多く検出されている。溶着金属と母材の境界部で約200μmにわたり、傾斜組成を有する領域が存在する。溶着金属部にFeが検出されるのは、鑄鉄からFeが溶け込んだためと考えられる。

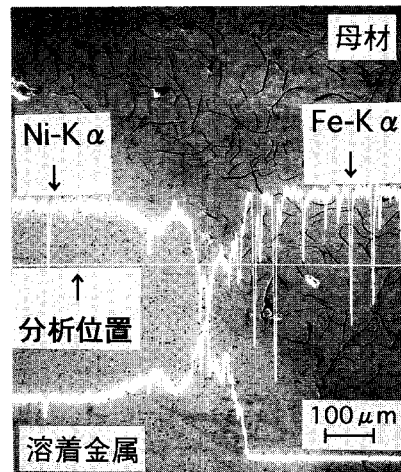


写真5 XMAによる熱影響部近傍のライン分析(予熱温度473K)

3.1.3 強度試験結果

強度試験の結果を図3に示す。曲げたわみ、曲げ強さ、引張強さいずれも473K予熱が最も優れており、373K予熱が最も劣る。引張試験における破断位置は、373Kと573KではHAZ部、473Kと523Kでは鑄鉄母材部であった。473Kでの引張強さは約170MPa

であり、これは母材強度143MPaを超えている。曲げたわみは、473Kの予熱条件が特にすぐれており、他の条件の約2倍である。これらの強度試験の結果は、X線検査結果およびマクロエッチによる溶着金属の検査において、473Kの試料がブローホール、割れ等の欠陥が最も少なかったことと対応している。

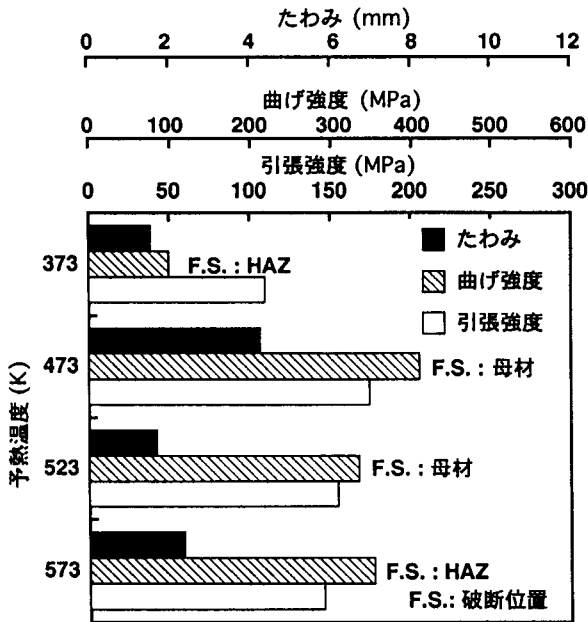


図3 予熱温度による強度試験結果

3.1.4 SEMによる破面観察

引張試験片の破面のSEM観察結果を写真6に示す。373K予熱材では大きな欠陥が見られる。表面付近

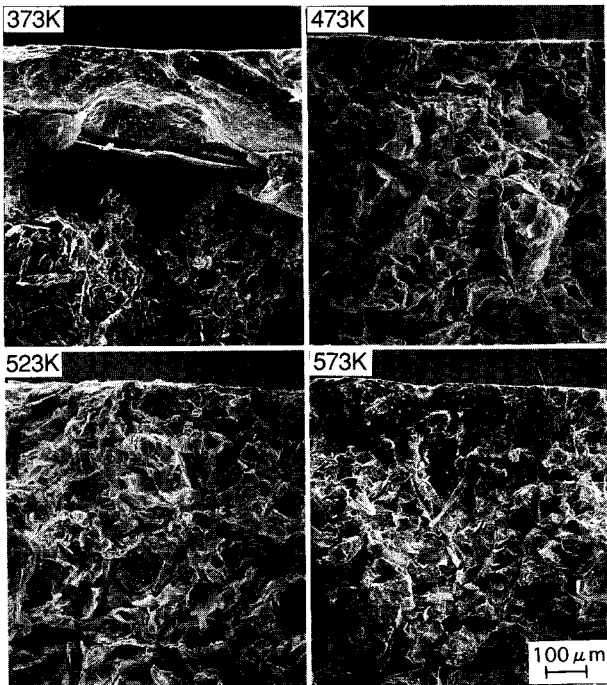


写真6 予熱温度による引張試験片破断面のSEM写真

の平滑面は写真2のX線検査に見られたクラックであり、ここを起点として破壊が生じたものと考えられる。また573K予熱材でも未溶着部分と思われる欠陥が存在し、ここから破壊が生じたものと考えられる。

473K予熱材、523K予熱材では通常の片状黒鉛鋳鉄の引張破面が現れており、母材からの破断であることが分かる。

3.1.5. 硬さ分布

溶着金属と母材の境界部の硬さ分布を図4に示す。硬度分布は測定された最高硬度の位置を境界（距離0）としてプロットしたものである。熱影響部の最高硬度は373K予熱材でHV450である。525K予熱材でもほぼ同じ値であるが、傾向としては予熱温度が高いほど最高硬さが低くなる。一方、隣接する鋳鉄側熱影響部の硬さは予熱温度が高いほど高く、熱影響部の幅が広い。溶接部近傍を強度的な観点から見た場合、最高硬さは低く、かつ熱影響部の幅は狭いのが望ましいと考えられる。実際、中間の予熱温度である473K予熱材が最高の強度、延性を示した。これは、硬さ、熱影響部の条件の他、ブローホール等の欠陥がこの温度において最も少なかったためと考えられる。予熱温度が低いほど溶着金属との温度差が大きく、熱影響部の硬さ上昇と残留応力の増加を来し、割れの影響性が

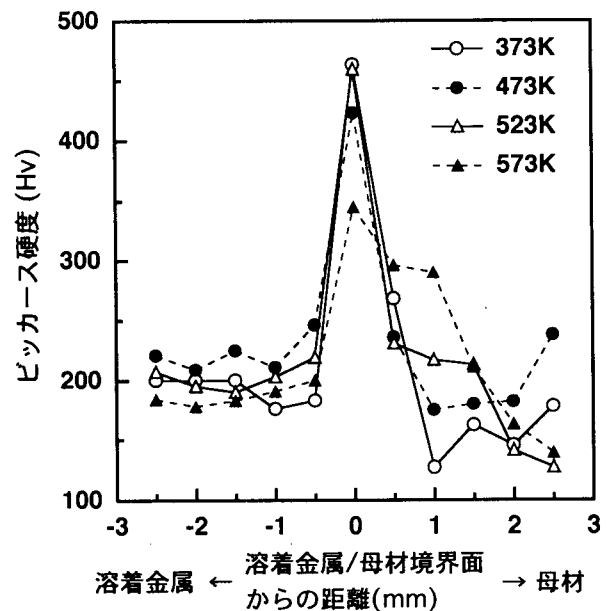


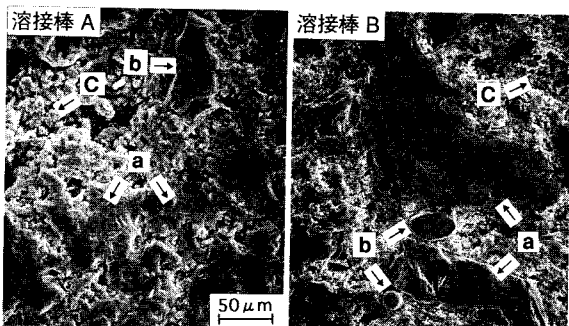
図4 予熱温度による溶着金属と母材境界部の硬さ分布

高くなったものと推察される。ブローホールの発生と予熱温度の関係は明らかではない。

3.2. 溶接棒による差違

3種類の溶接棒A, B, およびCを用い予熱温度473Kで溶接を行なった。X線検査の結果, 溶接棒A, Cではブローホールがあり, さらにCでは割れと溶込み不良が認められ, いずれも4級と判定された。一方, 溶接棒Bではわずかなブローホールがあるが, 欠陥の程度は軽微であり, 3級と判定された。この結果から, 欠陥が少ない溶接棒Bが最も好ましいと言える。

そこで, 溶接棒AとBを埋め込み樹脂に埋め込み, 研磨後, フラックス断面のXMA分析を行なった。写真7に溶接棒AとBのフラックス部のSEM像と分析結果を示す。第一点目として, 両者の間でフラックスの厚みに違いが見られる。第二点目として, SEM像中bで示す部分において, 溶接棒Aでは主にSiとZrが検出されたのに対し, 溶接棒Bでは主にFeとTiが検出された。第三点目として, 溶接棒BのSEM像中cで示すBaCO₃と推定される粒子は, Aに比べてかなり細かいものを使用していることが分かる。溶接棒A, Bによる溶接部の欠陥の差異は, 両者のフラックスの差に起因しているものと考えられる。



溶接棒	厚み	分析位置	X線検出強度			推定物質
			強	中	弱	
A	0.5mm	a	Ca	--	K, C, O	CaCO ₃
		b	Si, Zr	--	C	Si, Zr
		c	Ba, Ca	K	Si, Na, C, O	BaCO ₃ , CaCO ₃ , C
B	0.8mm	a	Ca	--	C, O	CaCO ₃
		b	Fe	Ti	Cr, Mn, Ba, C	Fe, Ti
		c	Ba	--	K, Ca, Si, Fe, Na, C, O	BaCO ₃ , C

写真7 溶接棒A, Bのフラックス部のXMA分析

溶接棒A, B, およびCによる溶接継手の強度試験結果を図5に示す。引張強度, 曲げ強度, たわみともに溶接棒による差は小さく, ほとんど変わらない

いと見なすことができる。

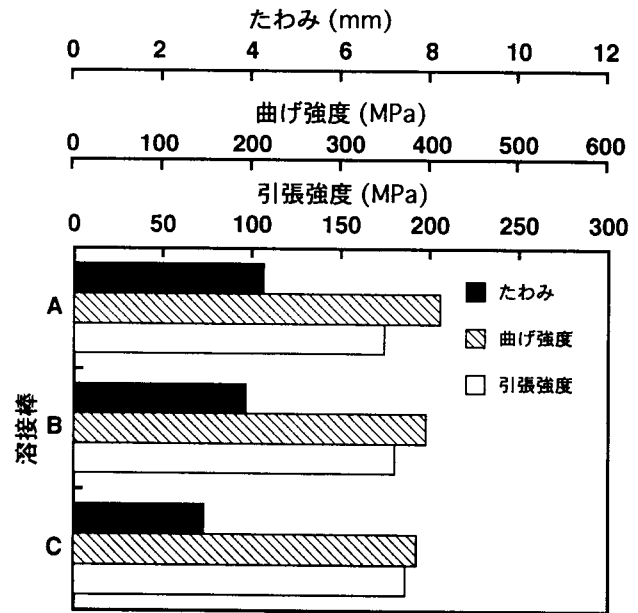


図5 溶接棒による強度試験結果

溶着金属- 鋳鉄母材の境界部の硬さ分布を図6に示す。最高硬さは溶接棒Aが最も高く, 溶接棒Bが最も低い。熱影響部の幅は溶接棒Cが最も広い。

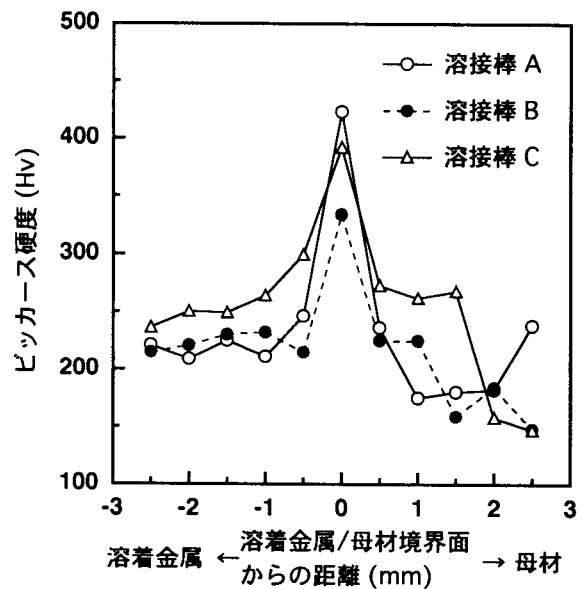


図6 溶接棒による溶着金属と母材境界部の硬さ分布

4. まとめ

被覆アーク溶接による鋳鉄の補修溶接の最適条件を把握し, また鋳鉄の構造溶接の可能性を検討する目的で, Ni基の溶接棒を用いた溶接実験を行った。片状黒鉛鋳鉄について予熱温度の効果, 溶

接棒の種類による差違について、X線検査、強度試験、組織観察などによって検討した。

実験の結果、予熱温度473KがX線検査、強度試験ともに最も好成績であった。これより低い予熱温度では熱影響部の最高硬さが高くなり、また予熱温度が高すぎると熱影響部の幅が広がり、強度に悪影響を及ぼす恐れがある。ブローホール等の欠陥の生成と予熱温度の関係は不明であるが、本実験では473Kより高い予熱では欠陥が多い傾向があった。

溶接棒の種類については、X線検査で1種類が良い結果であったけれども、たわみ以外の強度試験には明瞭な差がなかった。

以上の結果から、片状黒鉛鑄鉄のような低強度材では溶着金属の強度が母材に比べて高いので、大きな割れ等がないならば多少のブローホールがあっても母材部で破断し、継手強度には影響がないことが分かった。

鑄鉄の溶接は確かに困難ではあるが、適切な予熱温度とビード長さ、ピーニング等の溶接条件を選定することにより、現在の技術でも鑄鉄母材と

同程度の継手強度を実現することが十分に可能である。これらの条件の適切な管理と作業の習熟によって、溶接部の性状、強度特性をさらに向上させることが期待できる。

謝 辞

本研究は北海道立工業技術センターの長期実技技術研修において実施されたものである。同研修会参加の皆様方に謝意を表す。また、本報のまとめには北海道大学工学部 野口徹教授の御指導・御鞭撻を戴いた。心より謝意を表す。

参考文献

- 1) 溶接シリーズ編集委員会；鑄鋼，鑄鉄溶接のかんどころ（産報出版），（1978），P108.
- 2) 星野克英；大同工業大学紀要，19巻（1983），P39～54.
- 3) 日和佐工，森田国広，竜口康文，赤星勇自，佐藤勇，金平富太；福岡県北九州工業試験所研究報告，（1982），P113-127.