

鑄造欠陥の発生要因とその対策

技術講習会テキスト

と き 平成14年5月24日（金）

ところ 関西大学100周年記念会館（ホール1）

社団法人 日本鑄造工学会

鑄造欠陥の発生要因とその対策

1. 基調講演	
球状黒鉛鑄鉄の不良対策の考え方	1
— 引け、チル、チャンキー、ドロス —	
	早稲田大学理工学部 中江 秀雄
2. 鑄造欠陥エキスパートシステム	9
— 欠陥大百科 —	
	金沢学院大学経営情報学部 阿手 雅博
3. 鋳鉄鑄物の欠陥、不良対策事例①	18
生型鑄造ラインにおける欠陥対策の事例紹介	
	(株)クボタ 素形材技術部 上原 健文
4. 鋳鉄鑄物の欠陥、不良対策事例②	25
自動車用 中・小物鑄造品の不良対策の事例紹介	
	アイシン高丘(株) 生技センター 門脇廣一郎
5. 鋳鉄鑄物の欠陥、不良対策事例③	31
大物鑄造品のひけ巣およびその他不良対策の事例紹介	
	(株)木村鑄造所 菅野 利猛
6. ガス溶接球状黒鉛鑄鉄部材の品質評価	42
	(株)宇部スチール 糸藤 春喜

複写をされる方に

本書に掲載された著作物を複写したい方は、著作権者から著作権の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

学協会著作権協議会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 社団法人 日本工学会内

Tel. 03-3475-4621 Fax. 03-3403-1738

ガス溶接球状黒鉛鋳鉄部材の品質評価

(株) 宇部スチール ○糸藤 春喜、田村 幹夫

1. 緒言

近年、球状黒鉛鋳鉄（FCD）の凝固・冷却挙動が理解されるようになってきたことから、鋳物製造技術も格段の進歩を遂げている。一方では、顧客の品質要求も高くなっていること、及び非破壊検査技術の向上等から、従来の傷が、今や欠陥と判定されているケースが多い。欠陥を含む鋳物は、経済性や納期等を考慮すると廃却は難しく、やはり欠陥の補修技術が不可欠となる。

欠陥の補修には、大きく分けて3通りの方法がある。実作業において検討すべき順番を、優先順に以下に示す。しかし、最初のアクションとしては、欠陥の種類や発生状況を明確にし、許容か否かを顧客に再確認することを忘れてはならない。欠陥が傷となり、無処置で済むことも多々ある。

(1) ラウンド・オフ法

欠陥を除去した残肉厚が寸法許容内であれば、除去部が切欠きとならないように、周囲をグラインダにてならし加工する。

(2) プラグ、ブッシュ法

欠陥を除去し、切欠きとならないように加工した後に、その空洞部にプラグやブッシュをはめ込む。

(3) 溶接法

①アーク溶接

欠陥を除去し、開先整形した後に、Fe-50Ni被覆溶接棒にて埋める。

②ガス溶接

欠陥を除去し、開先整形した後に、共金で埋める。

溶接補修とする場合、ガス溶接の方が従来より実施され、補修部材として経験則的に安全性が高いとされている。しかし、ガス溶接部材の健全性や強度特性を定量的に示したデータは、これまでのところ殆どない。これらを明確にすることは、溶接技術及び適用製品の信頼性の向上のために重要である。

本研究では、厚肉FCD500の母材にガス溶接を実施し、その溶接部を非破壊検査及び破壊試験することにより、定量的に評価した。以下に、その確性試験結果を紹介する。

施した。破壊試験を除けば、補修を要する際のフローと同等である。主要工程の詳細を、以下に記述する。

(1) 厚肉供試材及び溶接棒の溶製

ガス溶接確性試験において、溶接性、溶接部の健全性及び機械的性質を評価する上で最も重要なことは、溶接母材となる供試材をいかに造り込むかにかかっている。母材が健全であり、尚且つ要求される材質相応の機械的性質を有していなければならない。これらの点を考慮し、 $900 \times 155 \text{ mm}$ の厚肉供試材を図2に示す要領にて2ヶ造型し、同一処理浴湯を同じ要領で鑄込んだ。一方を母材用、他方を鑄放し本体強度確認用とした。その化学成

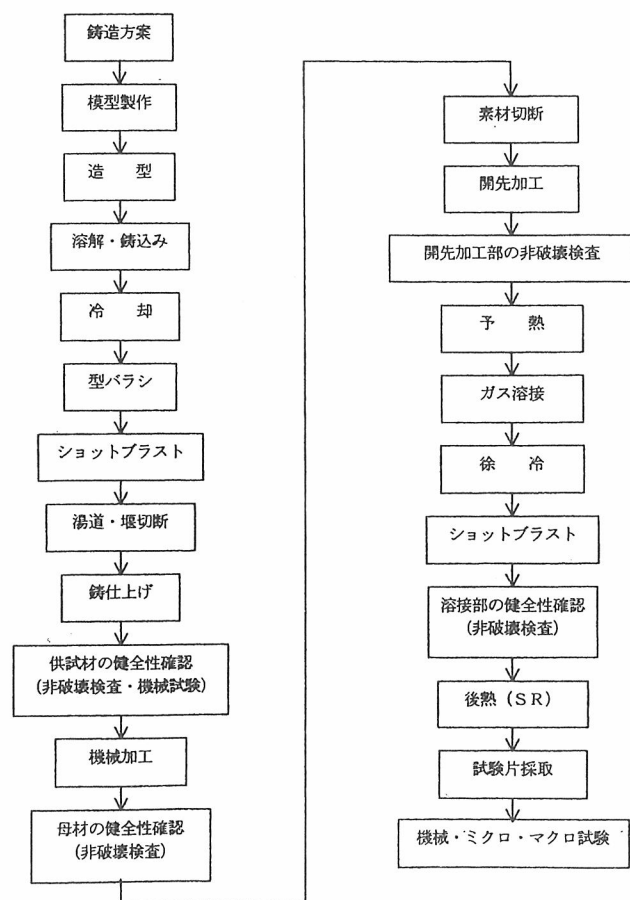


図1 ガス溶接確性試験のフローチャート

2. 試験方法

確性試験は、図1に示すフローチャートに沿って実

分を表1に示す。母材用厚肉供試材には、JIS G 5502-‘00に規定される $t=70\text{mm}$ の本体付供試材をつけた。また、ガス溶接に伴う 400°C 脆化への対応も考慮されている¹⁾。もう一方の強度確認用厚肉供試材には、同JISに規定されるB・C号Y形供試材を本体付けした。この他、B・C号Y形供試材を同一処理溶湯にて別鑄込みした。表1の化学成分は、全ての供試材にてFCD500の機械的性質を満足するように調整されている。

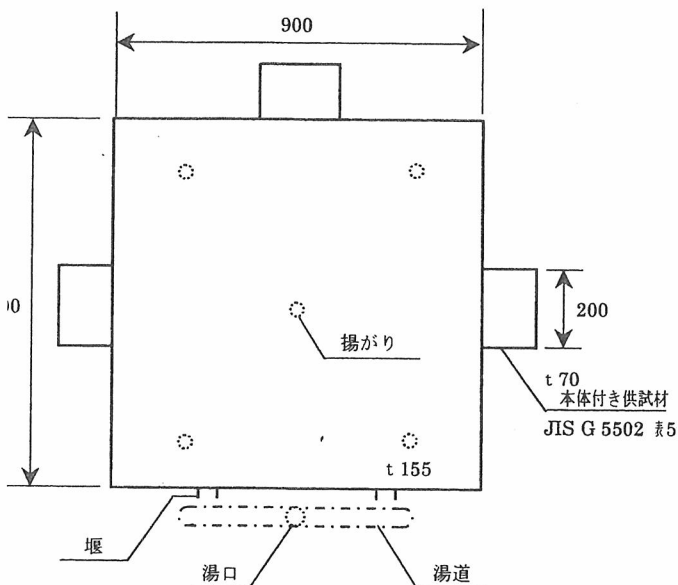
溶接棒は、作業性と溶接性の両面を考慮して、その形状・寸法を $\phi 18 \times L 900\text{mm}$ とし、図3に示す容量で10本を一括鑄込みとした。溶接棒の化学成分を表1に示す。溶接棒のMg含有量は、溶接時の酸化ロスやフェーディングを考慮して、母材用厚肉供試材より高めに設定した。

(2) 健全性及び機械的性質の予備確認

母材用厚肉供試材の上・下型面をグラインダ仕上

表1 母材及び溶接棒の化学成分 (mass%)

供試材	C	Si	Mn	P	S	T・Mg	F・Mg
母材	3.45	2.48	0.28	0.043	0.011	0.045	0.033
溶接棒	3.46	2.58	0.24	0.033	0.013	0.054	0.051



- *フラン鑄型、下型面に冷金使用
- *塗型 オーガニック G, F5(水性)
- *シャコマン8点締め
- *鑄込み温度 1360°C
- *鑄込み時間6.8sec.

図2 FCD500厚肉供試材の鑄造方案 (mm)

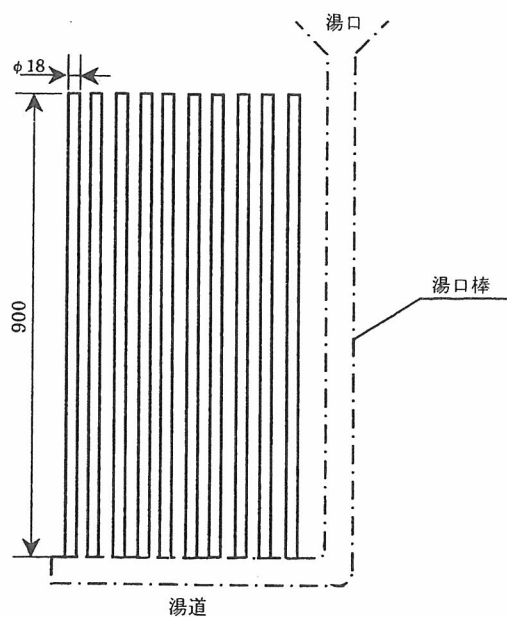
げ(150)して超音波探傷試験(UT)を実施し、母材として使用出来るか否かを見極めた。UTは、エコーによる引巣、ドロス等の欠陥の有無及び伝播速度測定による黒鉛球状化率の判定について行った。実際の製造工程においても、これらの早期把握が重要である。

FCDは、機械的性質に対する肉厚感受性が高い。溶製した強度確認用厚肉供試材がFCD500としての肉厚感受性の許容内にあることを確認するため、本体、本体付供試材、別鑄込み供試材の機械的性質を調べた。

(3) 母材の調整、開先加工及び非破壊検査

厚肉供試材の上・下型面を機械加工($\nabla\nabla$)して、 $900 \times 138\text{mm}$ とした。その両面についてPT及びUTを実施し、再度母材として使用出来るか否かを確認した。

次に、厚肉供試材をガス切断により2分割し、切断による硬化層をグラインダにより除去して母材とした。開先は、鑄込み姿勢に対して下型面側とし、溝状V型とした。開先は2通り加工し、一方を継手評価、他方を全溶着評価用とした。母材及び開先の形状・寸法を図4に示す。開先は、火炎がこもりにくい程度の角度(45° がベスト)とした。



- *フラン鑄型
- *2つ割り芯組合せ
- *塗型 オカスバー-750AE(アルコール)

図3 溶接棒の寸法及び形状 (mm)

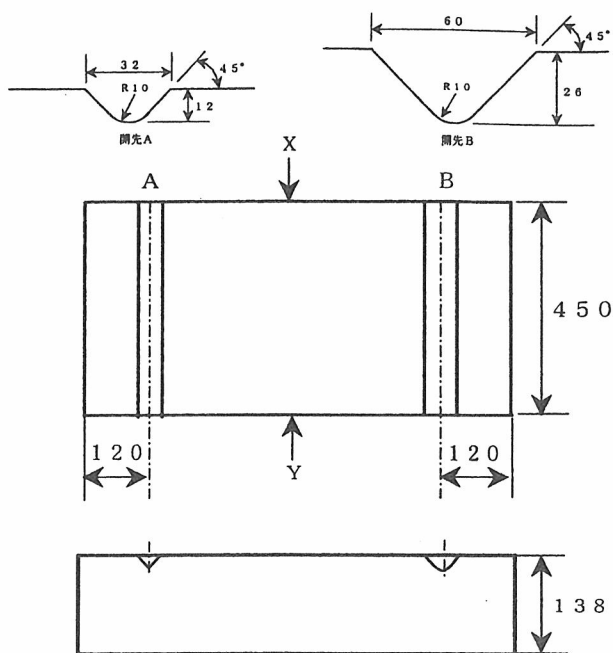


図4 母材の開先加工要領 (mm)

2通りの開先について、各々VT及びPTを実施した。

(4) ガス溶接要領

表2にガス溶接実施要領を示す。予熱の温度管理及び溶接中・後の母材の温度モニタは、Kタイプの表面温度計を用いて、図3に示すX、Y点にて行った。実製品においても、溶接性の確保や溶接歪・割れ防止等の観点から、溶接部及びその周辺の温度管理は、極めて重要である。溶接中の溶融プール温度は、直接モニタすることが不可能なため、湯面に軽く酸化皮膜を形成する程度 ($2C + SiO_2 \rightarrow Si + 2CO$ 反応遷移温度域) を目安とした。この温度域より低いと、ドロス・カミヤ融合不良が発生し、高いとCOガス欠陥が発生する。溶接後は、セラミック・ウールを覆って徐冷した。

(5) ガス溶接後の非破壊検査

ガス溶接部及びその周辺を目視観察後、ビード面をグラインダにて平滑に仕上げ、PT、湿式MT及びUTを実施した。

(6) 後熱

非破壊検査後、SiC炉にて応力除去焼鈍 (SR; $560^\circ C \times 6h$ 、炉冷) を実施した。

表2 ガス溶接要領

開先	45° V字型2通り
予熱	ガスバーナ及び木炭
予熱温度	450~550°C
溶接方法	酸素-アセチレンガス溶接
火炎	弱酸化炎
フラックス	20%硼砂+80%ソーダ灰
溶接姿勢	下向き
溶接棒	共金
後熱	SR: $560^\circ C \times 6h$ (炉冷)

(7) ガス溶接部の破壊試験による評価

2通りの開先に対して、以下の試験項目を実施した。

- ・引張試験
- ・両振り回転曲げ疲労試験
- ・マクロ試験
- ・HBS硬度試験
- ・ミクロ試験

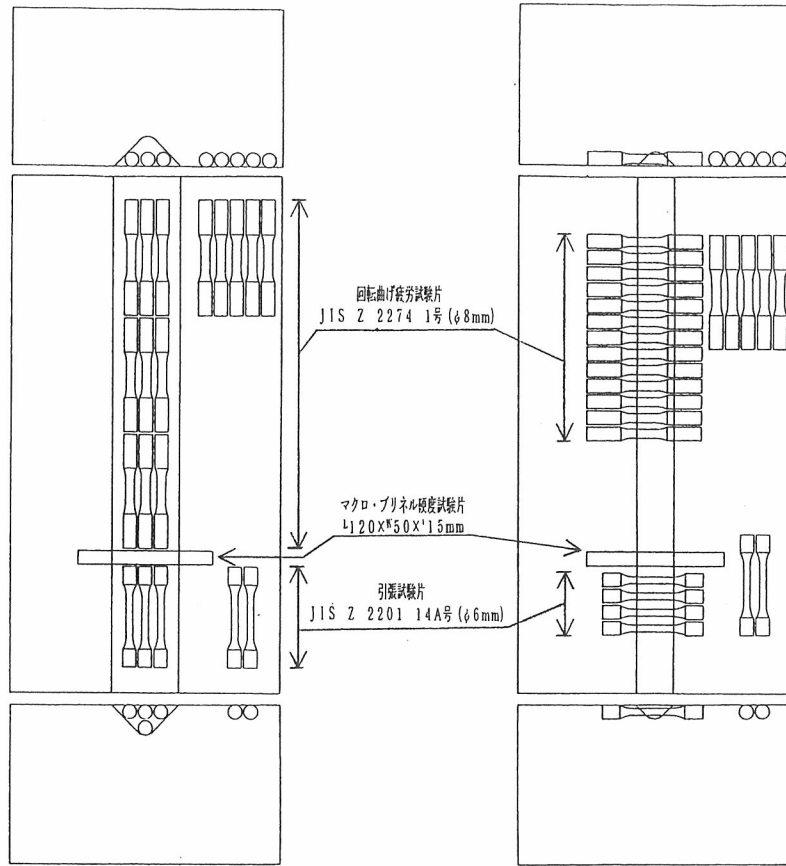
これらの内、引張及び疲労試験は、開先Aについては継手材的な評価を行い、開先Bについては全溶着金属評価を行った。両開先からの各試験片の採取要領を図5に示す。

3. 試験結果

(1) 厚肉供試材の健全性及び機械的性質

機械加工面のPTの結果、両板面に問題となるような指示模様は検出されなかった。UT結果についても、FCD特有のザク巣 ($B_1=0$ 又は $F > 30\%$ の領域) は検出されなかった。代表的なUT波形を図6に示す。溶接面の表面層については、分割探傷及び裏面からの垂直探傷を行い、健全性を確認した。ガス溶接母材用の供試材として適切な健全性を有していることを確認した。

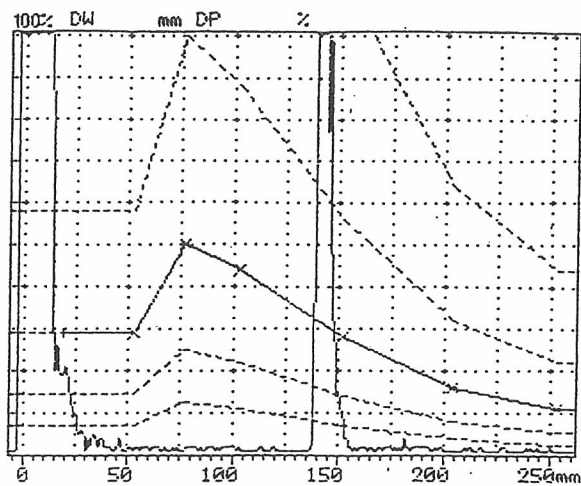
別鑄込み及び本体付供試材の引張・硬度試験結果を表3に示す。各供試材の引張・硬度試験結果は、JIS G 5502-00を満足していた。強度確認用厚肉供試材は、JISの肉厚感受性に沿った強度を有していた。もう一方の厚肉供試材が、機械的性質としてもガス溶接母材として適切なことを間接的に確認した。



開先B：全溶着材

開先A：継手引張材

図5 各溶接性評価試験片の採取要領



探傷感度；φ 3 mm A.R.L.

図6 母材用厚肉供試材の代表的なUT波形

(2) 開先の健全性

VT及びPTの結果、開先面には、欠陥は検出されなかった。PT現像の様子を図7に示す。

(3) ガス溶接

母材の温度変化の推移を図8に示す。溶接は、先ず開先Aについて行い、その後開先Bへと移行した。2通りの開先を連続溶接すると母材温度が上がり過ぎること、及び作業性を考慮して、適当な休憩をはさんだ。しかし、溶接中は、アーク溶接のようにパス間で休止することなく、連続作業とした。溶接は後退法とし、φ30~40mmの溶融プールをキープしながら、そのプールに溶接棒を溶加して

行った。フラックスは、発生スラグの融点を下げて軟化させるよう、適時溶接棒の先端につけて溶加と共に添加した。これにより、ビードと開先間、或いはビード同士間への発生スラグのかみ込み防止を図った。ガス溶接後の外観を図9に示す。

(4) 溶接部の健全性

開先の両端を自由端(壁なし)とした。このような場合、端面近傍の溶接部には、種々の欠陥が発生し易い。このため、溶接規格によっては、端面から50mm以内を削除させ、溶接部の評価に使わせないものもある。溶接部に対して、PT、湿式MT、UTを実施した結果、端面より30mm以内には、PT及びMTにより、アンダーカットやブローホール等の表面傷を検出した。またUTでは、φ6.3mmを超えるようなFエコーを

表3 各供試材の引張及び硬度特性 (As-cast材)

供試材	引張特性					硬度		
	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置	HBS 10/3000		
別 鑄 込 み	規格	≥320	≥500	≥7	—	—	150~230	
	B号 YB	367	576	13	11	A	197	
		349	548	15	14	A	184	
	C号 YB	331	517	15	14	A	182	
		328	517	14	12	A	180	
本 体 付 け	規格	≥290	≥420	≥5	—	—	130~230	
	B号 YB	374	582	11	8	A	228	
		357	549	13	11	A	221	
	C号 YB	330	512	16	12	A	183	
		333	514	14	12	A	186	
	φ70mm	315	430	24	25	A	145	
		298	433	22	20	A	148	
		299	426	27	25	A	149	
	本 体	目標*	≥260	(≥400)	(≥15)	—	—	(130~160)
		φ150mm	277	407	25	24	A	143
277			408	26	24	A	143	
278			405	24	23	A	138	

*印; DIN1693 Part 2, Table 3 GGG50 (φ120~200mm)
その他、() 内特性値=実績に基づく目標値

開先A 開先B

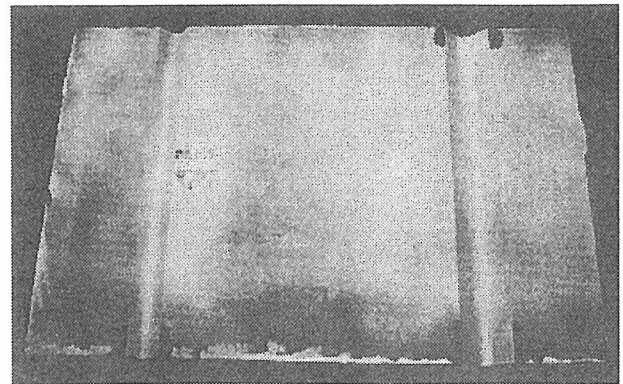


図7 母材開先面のPT結果

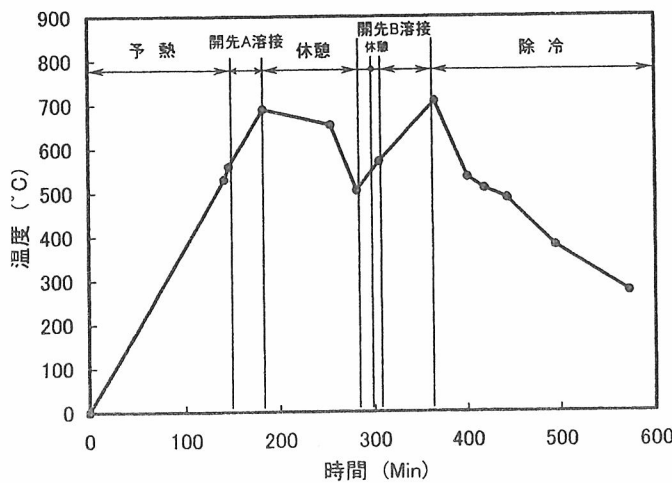


図8 ガス溶接時の母材温度の推移

開先A 開先B

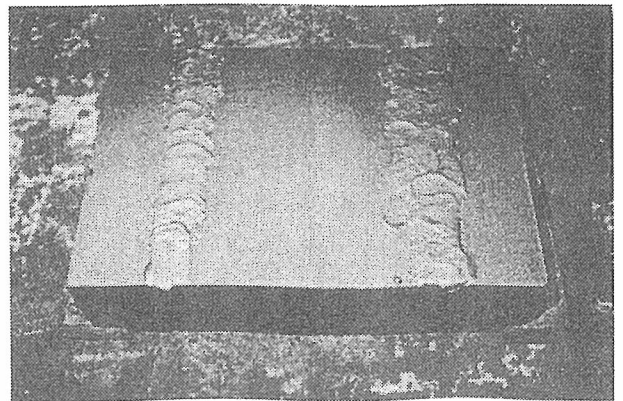


図9 ガス溶接後の外観 (ブラスト肌)

検出した。しかし、その領域を外れた内側には、 $\phi 1.7\text{mm}$ 以下相当のFエコーが、面積をもつことなく少数点在する程度であった。後に、このような箇所を切断したところ、Fエコーは、溶接中にガスがトラップされて形成されたと思われるマイクロポシティであることが判明した。しかし、この程度のポシティの存在は、FCDの場合、機械的性質を殆んど低下させることはない²⁾³⁾。ザク巢系の欠陥を示す $B_1=0$ 、共晶セル間のマイクロ巢を示す $B_1<30\%$ のようなエコーは、全く検出されなかった。これらのエコーは、欠陥の特性からして、ある程度の面積をもって検出される。バスタブ状開先の場合は、上述のような端面近傍の問題はない。

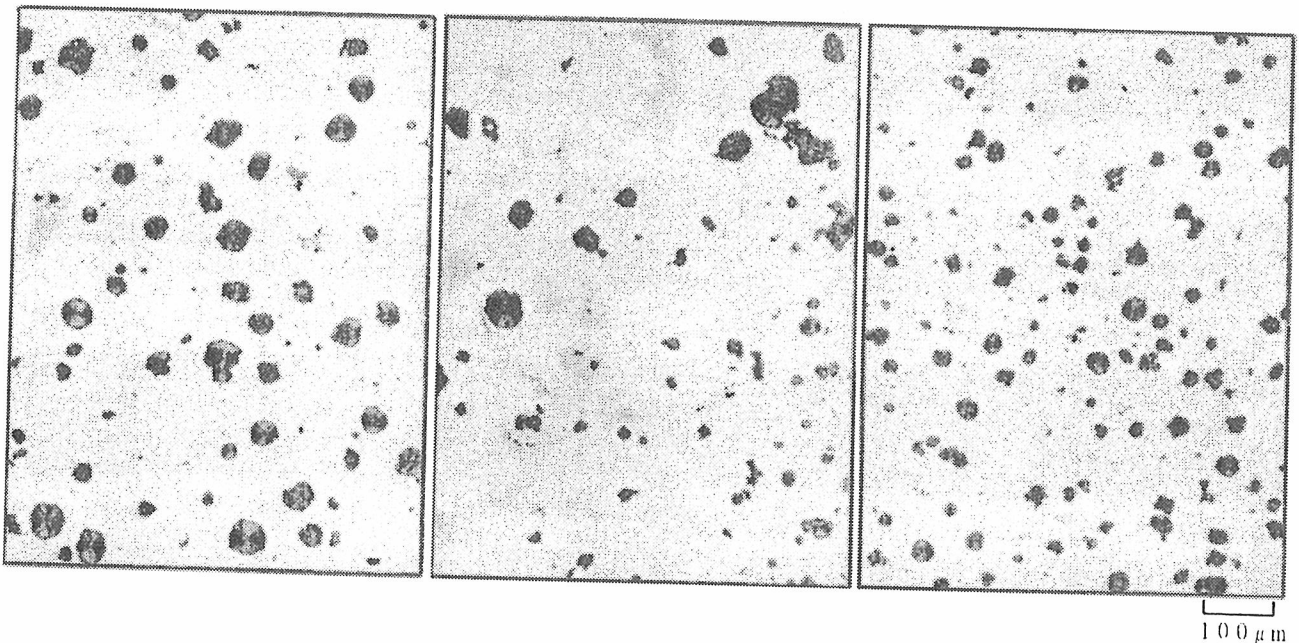
感度を高めたUTでは、境界部に相当する付近に、 $\phi 1.4\text{mm}$ 以下に相当するFエコーが検出された。後のマイクロ・マクロ組織の観察により、この種のFエコーは、母材と溶着金属との間の球状化率や黒鉛粒径の違い、及び熱影響部に析出しがちなパーライト層を検出したものであり、擬似Fエコーであることが判明した。溶着金属の黒鉛球状化率は、極めて良好な場合が多く、黒鉛粒径も小さい。

表4 本体付供試材の引張及び硬度特性 (SR材)

供試材 JIS G 5502	引張特性					硬度 HBS (10/3000) 130~230
	0.2%耐力 (N/mm ²) ≥290	引張強さ (N/mm ²) ≥420	伸び (%) —	絞り (%) —	破断 位置 —	
25mmYB	373	567	12	9	B	197
	356	543	11	11	B	190
50mmYB	326	509	16	14	A	177
	318	490	15	15	B	170
70×120mm	292	424	27	27	A	141
	300	429	22	16	A	144
	294	423	24	20	A	145

表5 ガス溶接部材の引張特性 (SR材)

供試材	引張特性				
	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置
母材	264	412	25	25	A
	260	420	23	20	A
	264	437	22	23	B
	262	420	24	24	A
継手引張 (開先A)	268	410	20	22	HAZ (B)
	269	411	22	26	HAZ (B)
	268	418	23	24	HAZ (B)
	271	414	20	16	HAZ (B)
全溶着 (開先B)	309	465	18	18	B
	290	433	14	17	B
	292	450	18	22	B
	299	463	16	18	B



a. 母材
黒鉛球状化率 ; 88.2%
パーライト面積率 ; 2.2%

b. 熱影響部
黒鉛球状化率 ; 87.7%
パーライト面積率 ; 7.8%

c. 溶着金属
黒鉛球状化率 ; 90.2%
パーライト面積率 ; 0.4%

図10 開先Aのマイクロ組織 (腐食液 ; 5%ナイタール)

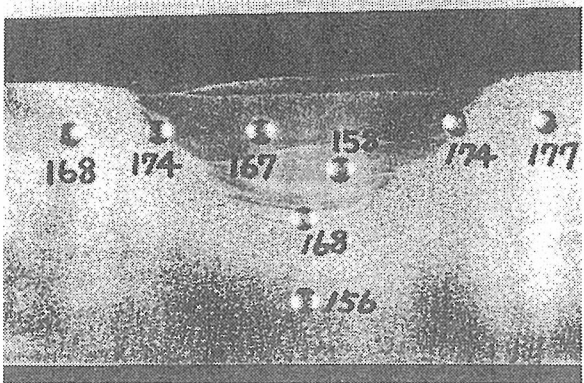
(5) 溶接部の機械的性質

SR後の標準供試材及びガス溶接部材の引張特性を、表4及び5に各々示す。母材は、0.2%耐力が僅かに劣るだけで、本体付供試材(φ70mm)とほぼ同等の引張特性を示した。この差は、FCDの肉厚感受性からするとやむを得ないところである。溶接部との比較では、全溶着材の強度が最も高く、母材と継手引張材は、同等の引張特性を示した。全溶着材の強度が高いのは、溶接時の凝固冷却が速いため、黒鉛粒が小さくなっていることが主な要因として挙げられる(図10)。

溶接部のマクロ組織に対して、ブリネル硬度試験を実施した。その結果を図11に示す。溶着金属と母材とでは、マクロ組織における色調が異なり、硬度に大差があるように思われた。しかし実測値は、2通りの溶接部の間で差があるものの、同一溶接部内には差があまり見られなかった。溶接部間



a. 開先A



b. 開先B

図11 ガス溶接部のマクロ組織及びブリネル硬度測定結果(腐食液; 5%ナイトール)

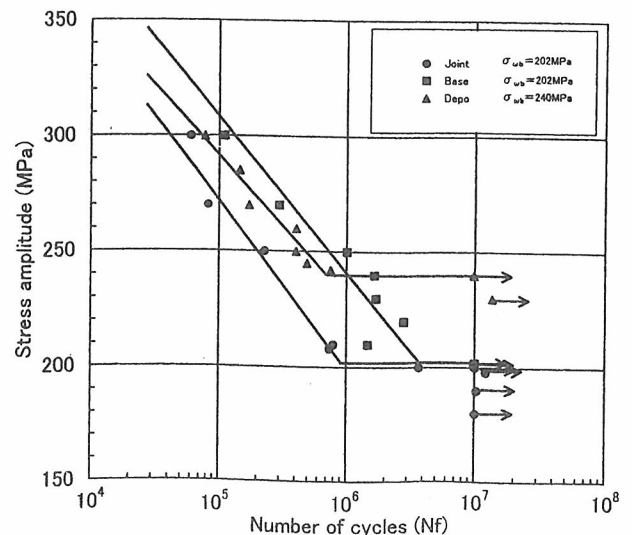
の硬度差は、溶接中の熱履歴の差によるものと思われる。マクロ組織の色調差は、黒鉛粒径とパーライト量の差に起因している(図10)。

両振り回転曲げ疲労試験結果を図12に示す。母材、継手試験材及び全溶着材間の疲労強度は、各供試材共に引張特性と同じ傾向を示した。全溶着材(Depo.)のそれが最も高い。耐力比R(疲労強度/引張強さ)も、各々約0.5と高い。

4. ガス溶接上のポイント

蓄積されたデータと熟練溶接者の技量を定量的に検討した結果、目的のガス溶接結果を得るためのポイントが見えて来た。その内の主要なポイントを以下に紹介する。

- (1) 欠陥の検出.....機械加工前
- (2) 欠陥除去・溶接.....機械加工前
- (3) 予熱.....溶接部450~
- (4) 550℃
- (5) 開先角度.....45°
- (6) 加熱トーチの火炎.....弱酸化炎
- (7) 熔融プールの温度.....軽く酸化膜をはる程度(1410~1440℃)
- (8) 熔融プールの大きさ...φ30~40mm



* 繰返し速度; 3600rpm
* 応力比; R=-1

図12 両振り回転曲げ疲労試験結果

表6 ガス及びアーク溶接法の比較

項目	ガス溶接	アーク溶接
1.作業性	高熱作業を伴う。 (予熱 450~550°C)	低温下での作業が良い。 (局部予熱 150~200°C)
2.技量	高度の熟練を要する。	適度の熟練が良い。
3.溶接量	加工前の比較的に多量の溶接に適す。	加工面等の少量溶接に適す。
4.外観	共金溶着金属につき、加工面の光沢は母材と同等。	Fe-50Ni 溶着金属につき、加工面の光沢が母材と大きく異なる。
5.引張特性	母材と同等か、それ以上。	母材より伸び・絞り値が低い ⁴⁾ 。
6.HAZ 硬度	高温予熱・SR の実施により、母材との間に大差を生じにくい。	低温予熱及び加工面への溶接で後熱が難しく、母材との間に大差を生じ易い。
7.疲労強度	母材と同等か、それ以上。	母材より低い ⁴⁾ 。
8.残留応力	高温予熱・SR の実施により、通常の残留応力に出来る。	低温予熱、後熱不十分につき、ピーニングしても溶接応力は残る。

- (9) 溶接棒の F・Mg 量…母材の 1.5 倍
- (10) スラグ粘度の調整……フラックスの使用
- (11) 健全性の証明……UTエコーと欠陥の関連把握
- (12) 後熱……通常の SR
(α 化焼鈍不要)

しかしながら、好結果を確実に得るには、依然として溶接者の技量と体力に頼らざるを得ないのが現状である。

5. アーク溶接との比較

工業的には、Fe-50Ni 被覆溶接棒を用いたアーク溶接が一般的であり、エンジニアリング・データも比較的多く見受けられる。ガス溶接に比べて作業が簡便で、比較的熟練を要しないことが、その理由として挙げられよう。しかし、溶接部の機械的性質は、ガス溶接より劣る。両者を総合的に比較した結果を表5に示す。

6. 適用例

自社のみならず国内外の同業者からの情報を取りまとめ、ガス溶接の適用例を以下に示す。適用は、小物よりむしろ中・大物品が対象となっている。

ダイカスト部品、インジェクション部品、

ガス・タービン部品、バルブ類、船舶エンジン部品、破砕ミル部品、ギヤケース、その他産業機械部品

7. まとめ

- (1) 溶接部内部の健全性は、UTにより十分に証明可能である。
- (2) 的確なガス溶接が実施されたなら、溶接部の機械的性質を母材と同等かそれ以上とすることが出来る。

8. 参考文献

- 1) 糸藤春喜、榊谷歩、影山秀明「FCDの高温脆化」日本学術振興会鑄物第24委員会鑄鉄分科会研究報告(2000) PP283-296.
- 2) 千葉信行、西村隆宣、手取外志郎「厚肉球状黒鉛鑄鉄のマイクロポロシティと機械強度」JACT NEWS (1985) PP8306~8309.
- 3) 糸藤春喜「厚肉FCDの非破壊評価の現状」鑄鉄材料の非破壊評価に関する研究、研究報告85、日本鑄造工学会(2000) PP19~20.
- 4) C.F.Walton & T.J.Opar, "Iron Castings Handbook", Iron Castings Society, Inc. (1981) PP599-665.