

摩擦接合技術

The Technology of Friction Welding

小方智寿*

Tomohisa Ogata

古城勝彦**

Katsuhiko Kojoh

摩擦圧接を難溶接材として知られる球状黒鉛鋳鉄へ適用した。FCD370同種材とFCD370とS45Cの組み合わせで、摩擦圧接中の温度測定、接合部組織観察、接合部の引張試験、回転曲げ疲労試験を行った。その結果、FCD370の接合部の組織は基地組織であるフェライトが界面近傍ではパーライトへ変化した。セメントライト、マルテンサイト、球状黒鉛の異常、き裂および介在物は観察されず、連続した健全な組織が得られた。引張試験および回転曲げ疲労試験では接合部の強度はFCD370母材と同等であった。フェライト化焼鈍後の引張試験の結果から、引張強度は界面の黒鉛円形度と線形の相関が認められた。

Friction welding was applied to ductile cast iron, a poor weldability material. It was carried out using a combination of FCD370 fellow and FCD370/S45C, which changed the base ferrite microstructure of the FCD370 into pearlite near the interface. Cementites, martensites, abnormality of spheroidal graphite, cracks, or inclusions were not observed. All specimens were broken at the base material in tensile and fatigue test. Through a tensile test after annealing, the graphite circularity rate of the interface was found to be correlated with tensile strength.

① 緒 言

球状黒鉛鋳鉄は鋼に匹敵する機械的性質を有し、複雑形状の形成が容易で安価なことから、自動車部品をはじめとする機械部品への適用が拡大している。そのなかで球状黒鉛鋳鉄と同材種・異材種間の接合の要求も高まってきた。球状黒鉛鋳鉄にアーク溶接などの熔融溶接を適用すると母材が熔融し、それが凝固する際にセメントライトが発生するため接合部の強度は母材の強度よりも大きく低下する。そのため球状黒鉛鋳鉄の接合は一般的に困難とされてきた。そこで本研究では鋳鉄を接合するために母材を熔融させない摩擦圧接の適用を試みた。

摩擦圧接は物を擦り合わせたときに生じる摩擦熱を利用して接合するという簡単な原理の接合法であり、鋼では広く利用されている。ほかの溶接法と比較すると、接合部の機械的性質が高い、溶接棒や溶剤などを必要としない、エネルギー効率が高い、異種金属の組み合わせが可能である、などの特徴を持っている¹⁾。

平成6年にはJISに「炭素鋼の摩擦圧接作業標準」²⁾が

制定され、技術的には摩擦回転停止時の角度を任意の角度とする位相制御技術が確立されており、摩擦圧接の適用は増大していくと予想される。

これまでの研究報告³⁾によると炭素鋼、ステンレス鋼、アルミ合金などの継手の引張強度・曲げ強度は母材と同等以上、疲労強度は母材の70～100%と強度部材にも使用できると考えられる。球状黒鉛鋳鉄またはそのほかの鋳鉄についても適用例^{4)～7)}はあるものの、接合部の機械的性質とミクロ組織とを関係付けて考察した報告は見られない。これらの報告にもあるように鋳鉄は接合面に黒鉛が潤滑膜を形成し鋼に比べ十分な発熱を得られず接合自体困難である、界面にセメントライトが残留する、球状黒鉛が偏平化するなど、十分な接合強度を得るためには問題を残している⁸⁾。

そこで本研究では球状黒鉛鋳鉄FCD370同種材およびFCD370と機械構造用炭素鋼S45Cの異種材を組み合わせ、摩擦圧接中の界面の挙動や接合部のミクロ組織を観察し、接合部の機械的性質と接合部のミクロ組織の関係を考察した。

* 日立金属株式会社 素材研究所

** 日立金属株式会社 本社 技術本部

* Casting Technology Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.

** Technology & Development Div., Head Office, Hitachi Metals, Ltd.

表 1 機械的性質

Table 1 Mechanical properties

| Material | Yield strength 0.2 (N/mm ²) | Tensile strength B (N/mm ²) | Elongation (%) |
|----------|---|---|-------------------|
| FCD370 | 286 | 442 | 22.9 |
| S45C | 406 | 703 | 28.0 |

表 2 化学成分

Table 2 Chemical composition of specimen (wt%)

| Material | C | Si | Mn | P | S | Cu | Mg |
|----------|------|------|------|-------|-------|------|-------|
| FCD370 | 3.75 | 2.30 | 0.24 | 0.018 | 0.011 | 0.03 | 0.035 |
| S45C | 0.46 | 0.26 | 0.68 | 0.022 | 0.016 | 0.06 | - |

表 3 球状黒鉛の特性値

Table 3 Characteristics of nodular graphite

| Graphite nodule count (1/mm ²) | Mean graphite diameter (μm) | Vol. of graphite (%) | Nodularity of graphite (%) |
|--|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 203 | 22.5 | 11.8 | 80 |

② 実験方法

供試材として球状黒鉛鋳鉄FCD370相当材と市販の機械構造用炭素鋼S45Cを使用した。試験片形状は実用上中実丸棒より中空丸棒を接合する製品が多いと予想されるので外径80mm、内径60mm、長さ80mmの円筒を中心に後述の疲労試験用に内径を40mmに変更した試験片の2種類とした。FCD370は内・外周面は鋳肌で両端面は旋盤加工を、またS45Cは全面加工を施した。その化学成分、機械的性質およびFCD370の特性値を表1～3に示す。

摩擦圧接機はブレーキ式、最大摩擦推力196kN、最大アプセット推力392kN、主軸回転数1,000～1,800rpmのものを使用した。摩擦圧接は摩擦圧力P1を20～70MPa、摩擦寄り代U1を2～14mm、アプセット圧力P2を40～120MPa、アプセット時間T2を5sec、回転数rを1000rpmに設定し行った。また接合端面から2, 5, 10mmの位置に直径3mm深さ5mmのドリル穴を加工、熱電対を挿入し接合中の温度分布を求めた。得られた温度分布曲線を摩擦面にまで外挿して、界面の到達温度を推定した。外挿近似には鋼同士の摩擦圧接での報告^{9), 10)}における界面推定温度とよく一致した直線近似を使用した。

摩擦圧接後は供試材の接合部の縦断面を金属顕微鏡で観察した。また接合後の黒鉛球状化率を円形度と定義した。円形度と定義したのは接合により黒鉛が球状化されたのではないことから、球状化本来の定義との混同を避けるためである。円形度は母材の球状化率測定と同じ方法¹¹⁾で画像解析装置を用いて求めた。主な試料はEPMA (Electron Probe Micro Analyzer) を用いて球状黒鉛鋳鉄の主要元素であるC, Si, Mnの分析を行った。

摩擦圧接後、一部の試験片は摩擦熱に起因する基地組織変化の影響を除去するために973Kで1時間保持後大気

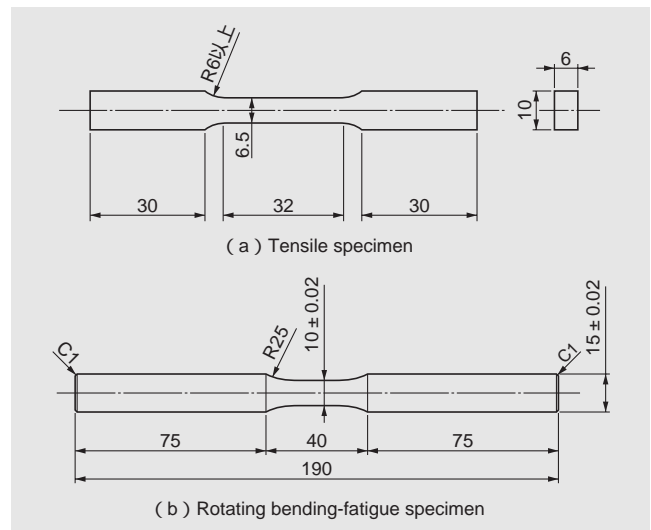


図 1 試験片

Fig. 1 Specimens

放冷する焼鈍処理を施した。

接合した中空丸棒試験片から図1に示すような試験片を切り出し引張試験と回転曲げ疲労試験に供した。接合界面が試験片の中央に位置するように加工した。

③ 実験結果および考察

3.1 FCD370同種材の接合

図2に摩擦圧接中の温度を測定した結果と界面温度を推定した結果を示す。図にはFCD370材との比較のため、S45C同種材を同一圧接条件で摩擦圧接した時の界面温度推定曲線も併せて示した。FCD370同種材ではS45C同種材と比較して摩擦寄り代4mmを得るための時間を約8

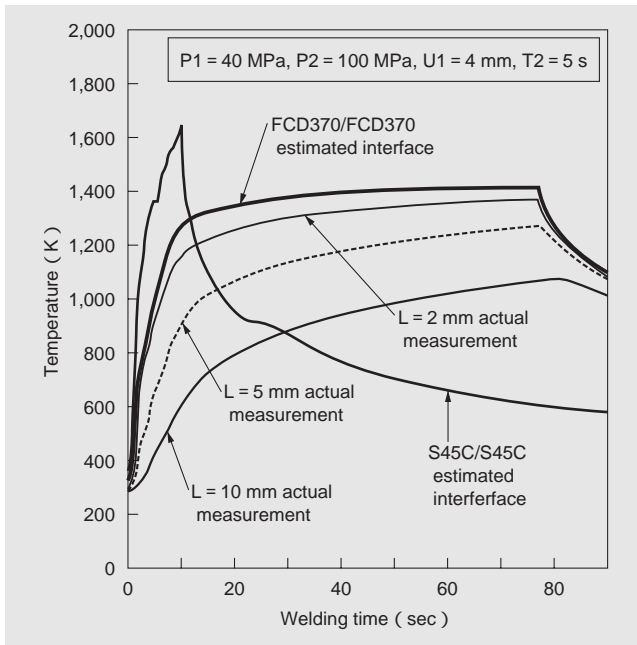


図2 FCD370同種材摩擦圧接中の温度分布

Fig. 2 Distribution of temperature during friction welding in combination with FCD370 and FCD370

倍要している。これまでの報告^{3)~5)}のようにFCD370が有する黒鉛の潤滑作用により摩擦係数が低下し、摩擦時間が長くなったと考えられる。界面の最高温度は1,413K

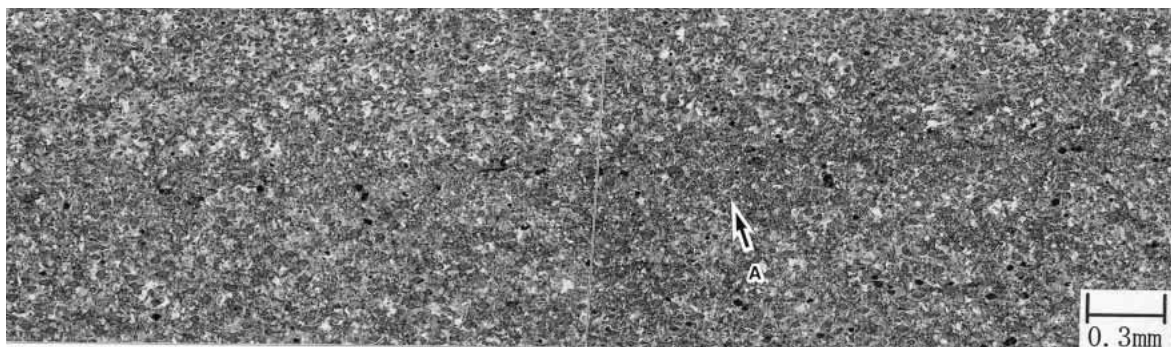
とFCD材の融点とほぼ等しく、摩擦中材料は一部溶融していると考えられ、摩擦圧接中に溶融物の飛散が観察された。S45C同種材の最高温度は1,663KとS45Cの融点より低く溶融は観察されなかった。

図3に接合部のミクロ組織を示す。基地組織はFCD370母材のフェライトからパーライトへ変化していた。基地組織以外は母材とほぼ同様に黒鉛の形状や分布状態に大きな変化はなかった。セメントナイト、き裂、介在物は観察されず、連続した接合組織が得られることがわかった。バリ部に注目するとセメントナイトが観察される。これより接合中に溶融した部分は界面に残存せず、アプセット圧力によってバリとして界面から排出され、界面は清浄な面と面の固相状態で接合したと考えられる。

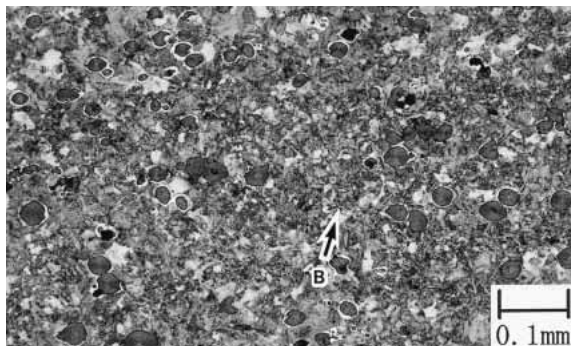
図4はEPMAの分析結果を示す。Cが極端に多くっている部分は黒鉛部に対応する。C, Si, Mnともに拡散は見受けられない。同種材のために相互に拡散しているも本図から拡散を判断することはできなかった。

図5は引張試験結果を示す。圧接条件を変化させているにもかかわらず、すべて母材部で破断した。これは界面近傍の基地組織がフェライトからパーライトに変化したため、界面付近が強化されたことが原因と考えられる。そこで焼鈍を行い基地組織をフェライトにそろえ、同様に引張り試験を行った。

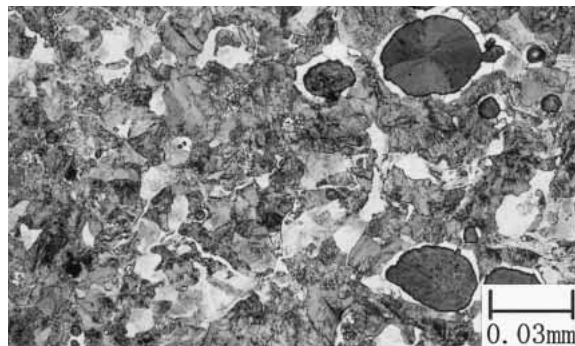
その結果、母材で破断した材料は9本中1本で残りは接合面で破断した。基地組織がフェライトにそろえられたことで、接合面で破断したのは摩擦圧接後の界面の状態に差があると考え、全試験のミクロ組織観察を行った。



(a) Interface



(b) Expanded view of A



(c) Expanded view of B

図3 FCD370同種材接合部ミクロ組織

Fig. 3 Micro-structure of interface

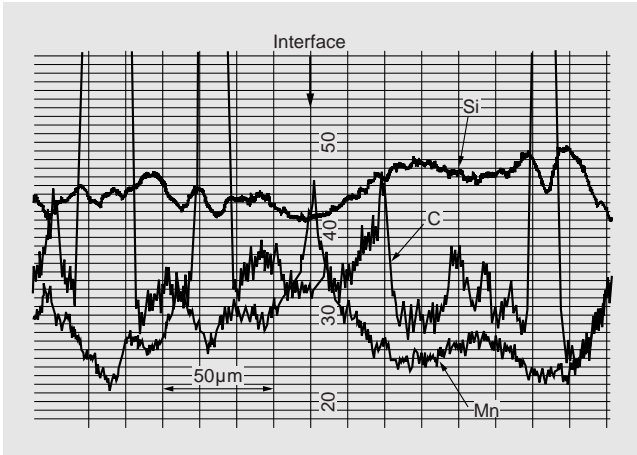


図4 EPMA分析結果
Fig. 4 EPMA analysis results

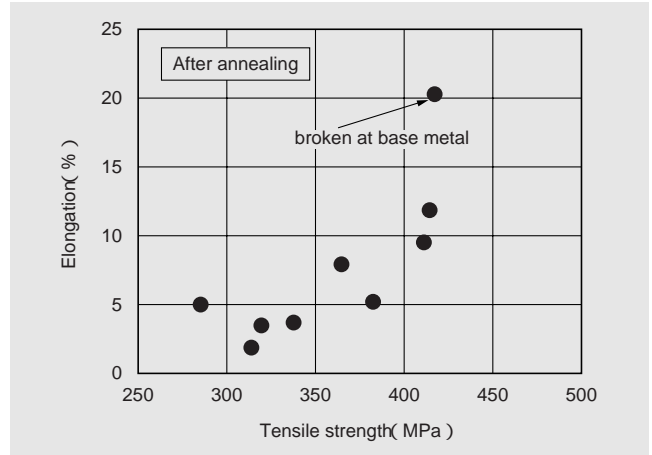


図6 引張試験結果（焼鈍後）
Fig. 6 Relationship between elongation and tensile strength (after annealing)

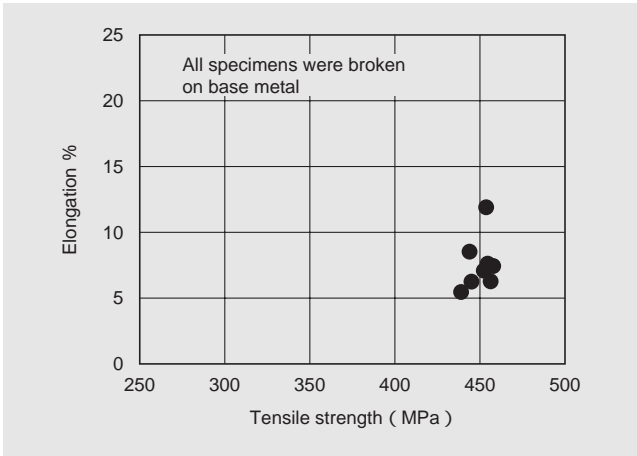


図5 引張試験結果（圧接のまま）
Fig. 5 Relationship between elongation and tensile strength (during welding)

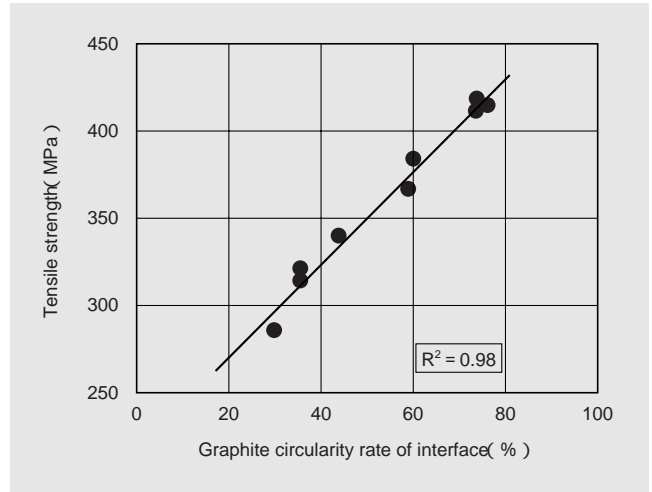


図7 黒鉛円形度と引張強さの関係
Fig. 7 Relationship between graphite circularity rate of interface and tensile strength

接合に起因する介在物などは見受けられなかったが、圧接条件の違いにより界面近傍の黒鉛の形態が大きく異なることがわかった。そこで、各試験片の接合後の黒鉛の円形度を計測し、引張試験結果との関係を求めた。その結果を図7に示す。図中の直線は最小二乗法による回帰直線で相関係数 R^2 は0.98とよい相関があった。

図8は黒鉛の変形を抑えた圧接条件で接合した試験片を用い回転曲げ疲労試験を行った結果である。疲労限度より高い応力で破断した試験片はすべて母材部から破断した。疲労限度も250MPaと推定され、FCD370母材と同等¹²⁾であった。

以上のことから、球状黒鉛鋳鉄同種材の摩擦圧接において、黒鉛形態を母材と同等にすることが重要でその制御は圧接条件の適切な組み合わせにより実現可能なので、摩擦圧接した球状黒鉛鋳鉄は耐高負荷性能が要求される部位への適用も可能と考えられる。

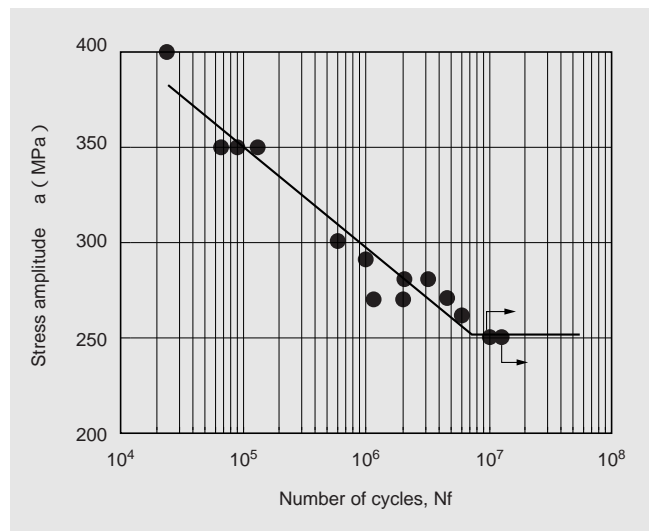


図8 S-N曲線
Fig. 8 S-N curve

3.2 FCD370とS45Cの接合

図9に摩擦圧接中の温度を測定した結果と界面温度を推定した結果を示す。図には比較のためS45C同種材を同一圧接条件で摩擦圧接した時の界面温度推定曲線も併せて示した。同じ摩擦寄り代を得るのに要する時間はS45C同種材の約4倍でFCD370同種材の摩擦時間に比べ半分となった。界面の温度に注目すると摩擦終了時の最高温度は1,413KとFCD370同種材の場合と同様にFCD370の融点に達しており、摩擦中には熔融物の飛散が観察された。融点の異なるS45Cとの組み合わせにおいてはこれまでの異種金属接合の報告¹⁰⁾と同様に、界面温度は融点の低いFCD370の融点以上にならないことがわかった。

接合部ミクロ組織を図10に示す。FCD370はFCD370同種材との接合と同様に基底組織がフェライトからパーライトへ変化した。界面近傍は母材に比べ黒鉛数が少ない、き裂や介在物、セメントタイト、マルテンサイトは観察されなかった。バリ部にはFCD370の熔融を示すセメントタイトが観察された。S45Cの界面付近は母材と比べパーライトが増加していることから、FCD370側から炭素が拡散したと推測される。C, Si, MnのEPMA分析結果を図11に示すが、CのみがFCD370母材レベルからS45C母材レベルまで約0.1mmの幅で緩やかに拡散していた。図10のミクロ組織観察でS45Cのパーライトが増加した範囲と一致する。

以上のことから、FCD370とS45Cの組み合わせにおいてFCD370は摩擦により熔融した部分はアプセットによりバリとなって排出され清浄な面が出現する。S45Cは

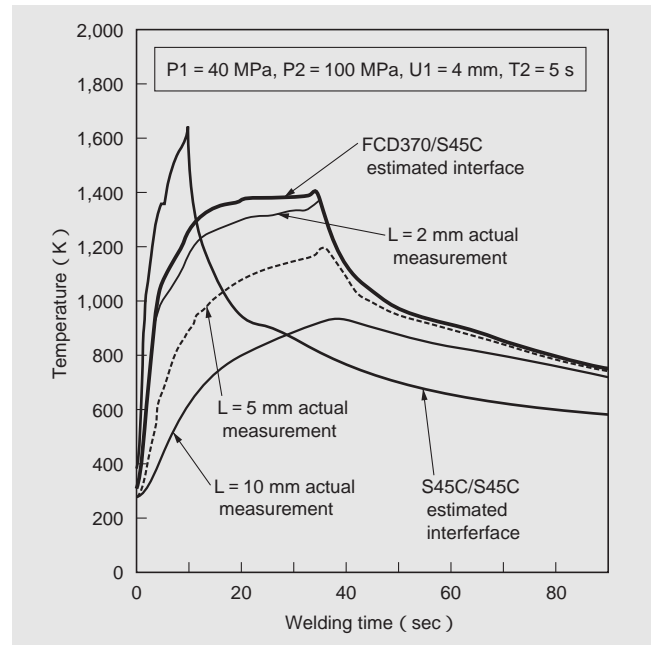
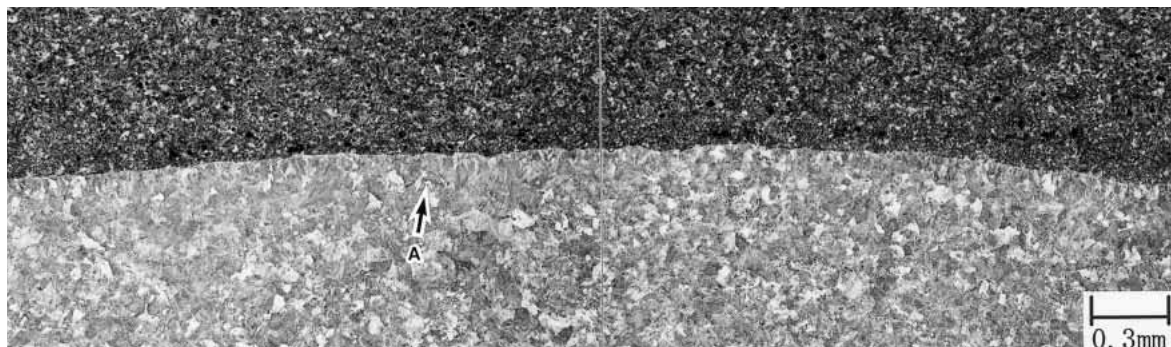


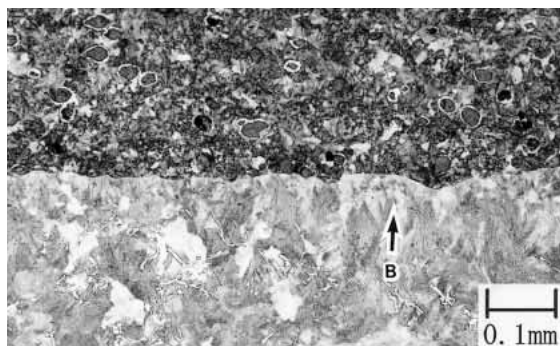
図9 摩擦圧接中の温度分布

Fig. 9 Distribution of temperature during friction welding in combination with FCD370 and S45C

摩擦熱による変形で最初に摩擦した面はバリとして外部に排出され清浄な面が出現しアプセット圧力によって固相接合されると推定される。



(a) Interface



(b) Expanded view of A



(c) Expanded view of B

図10 FCD370/S45C接合部のミクロ組織

Fig. 10 Micro-structure of interface

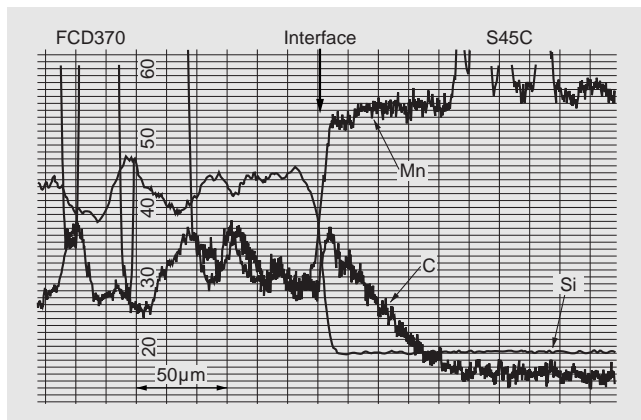


図11 EPMA分析結果

Fig. 11 EPMA analysis results

FCD370とS45Cの接合においても摩擦圧接条件によっては黒鉛の円形度が大きく低下した。そこで黒鉛の円形度を低下させない条件で接合した試験片を引張試験した結果、圧接のままの状態ではすべてFCD370母材部で破断した。そこでフェライト化焼鈍を行い基体組織をそろえて引張試験した結果を図12に示すが、破断はすべてFCD370母材部から破断した。接合部はFCD370母材と同等以上の強度を有することがわかった。回転曲げ疲労試験を行った結果を図13に示す。

FCD370同種材と同様、疲労限はFCD370並の250MPaと推定され、有限寿命域ではすべてFCD370母材部から破断した。以上のことから、FCD370とS45Cの接合についても接合部の強度はFCD370の母材と同等の機械的性質をと考えられる。

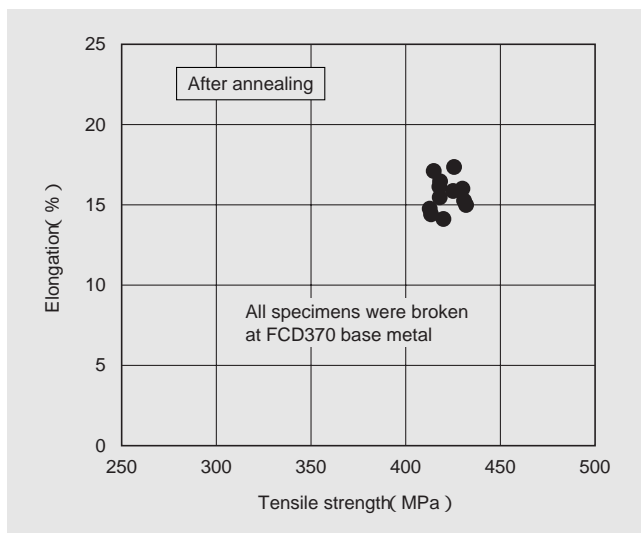


図12 引張試験結果

Fig. 12 Relationship between elongation and tensile strength (after annealing)

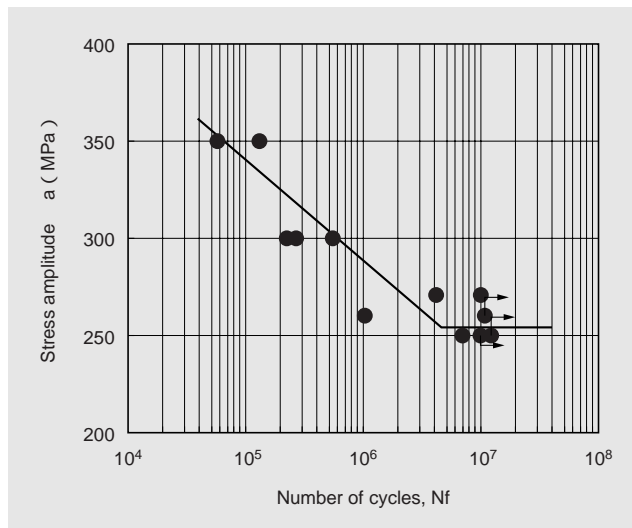


図13 S-N曲線

Fig. 13 S-N curve

④ 結 言

FCD370同種材、FCD370とS45Cの組み合わせで摩擦圧接を行った結果以下のことがわかった。

- 1) 摩擦圧接中、界面温度はFCD370の融点に達し溶融した。溶融物はアブセットにより界面から排出されていた。
- 2) 接合部ミクロ組織は黒鉛形状や分布状態に大きな乱れはなく、介在物やき裂およびセメントタイトやマルテンサイトは観察されなかった。
- 3) 両組み合わせとも、引張試験および回転曲げ疲労試験において、接合部はFCD370母材と同等以上の強度を有していた。
- 4) FCD370同種材の組み合わせで、焼鈍し後の接合部の引張強度は界面の黒鉛円形度と線形の相関が認められた。

最後に、本研究の遂行にあたりご指導ご助言いただきました、名古屋大学工学部篠田助教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) 摩擦圧接協会編：摩擦圧接，コロナ社，(昭和54)，6
- 2) JIS Z 3607 炭素鋼の摩擦圧接作業標準
- 3) たとえば D.E.SPINDLER (中村孝 訳)：摩擦圧接，1 (1994)，65
- 4) 田中彬夫，戸川進：鋳物，45 (1973)，132
- 5) 蓮井淳，小川正幸，岡田健次：溶接学会誌，46 (1977)，258
- 6) Richer, Palzkil: Welding and Cutting, 37 (1985)，2，60
- 7) 篠田剛，星野克英，山下昇一：摩擦圧接，2 (1994)，23
- 8) 小方智寿，古城勝彦，永吉英昭：鋳造工学，77 (1998)，12，873
- 9) 蓮井淳，福島貞夫，衣川純一：金属材料技術研究所研究報告，11 (1968)，203
- 10) 摩擦圧接協会編：摩擦圧接，コロナ社，(昭和54)，35
- 11) 日本鋳物協会編：鋳物便覧改訂4版，丸善，(昭和61)，569
- 12) たとえば 越智，他3名：機械学会論文集A，57-359 (1991)，1448