

JAERI-Research

97-015



研究炉用アルミ合金の機械強度特性

1997年3月

柴田勝之・菊池博之・金田義朗・古平恒夫・市川博喜

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

研究炉用アルミ合金の機械強度特性

日本原子力研究所東海研究所研究炉部
柴田 勝之⁺¹・菊池 博之・金田 義朗
古平 恒夫⁺²・市川 博喜

(1997年2月3日受理)

アルミ合金は中性子経済に加え、耐食性、加工性にも優れた性質を有することから、研究炉の構造材として多用されているが、研究炉の老朽化対策や高性能新型研究炉開発にあたり材料データベースの整備が必要となっている。そのため、高性能新型研究炉の開発研究の一環として、平成3年度からアルミ合金の照射試験を開始した。この研究では、中性子照射による強度特性の変化、とくに破壊靱性の変化を明らかにすることを目的に実施している。

すでに、A5052-0材およびA6061-T6材について母材および溶接継手のシャルピー衝撃試験、引張り試験および破壊靱性試験を完了している。また、照射材についても、JRR-3でのキャプセル照射と東海研ホットラボでの照射後試験を進めている。

本報告は、非照射材の強度試験結果をとりまとめたものである。A5052アルミ合金母材については試験片寸法が小さく有効な破壊靱性値は得られなかったが、A5052材の溶接継手およびA6061材の母材および溶接継手について有効な値が得られた。A6061母材の破壊靱性はA5052およびA6061の溶接継手材に比べて極めて低く、構造材として使用する場合、母材の脆性破壊防止に注意が必要なが分かった。

Fracture Toughness and Mechanical Properties
of Aluminum Alloys for Research Reactors

Katsuyuki SHIBATA⁺¹, Hiroyuki KIKUCHI, Yoshiro KANEDA
Tsuneo KODAIRA⁺² and Hiroki ICHIKAWA

Department of Research Reactor
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 3, 1997)

Aluminum alloys have been used as the structural material of the research reactor or because of their good properties for corrosion resistance and machinability as well as high neutron economy. In order to respond to the needs to maintain the aged core structure and to utilize for the high performance research reactor, irradiation test of aluminum alloys were initiated to provide the data base on the toughness and strength of aluminum alloys aged under research reactor condition.

This report describes the results of tensile test, hardness test, Charpy impact test and fracture toughness test on A5052-O and A6061-T6 aluminum alloys under the unirradiated condition. From those tests, it was found that base metal of A5052-O has the highest toughness, welded joints of A5052-O and A6061-T6 is equivalent and have medium toughness, and base metal of A6061-T651 has very low toughness.

+1 Department of Reactor Safety Research

+2 Department of Hot Laboratory

目 次

1. はしがき	1
2. 供試材の化学成分、機械的性質	2
3. 試験片製作	2
4. 試験方法	3
4.1 引張り試験	3
4.2 硬さ試験	3
4.3 シャルピー衝撃試験	3
4.4 破壊靱性試験	3
5. 試験結果と考察	4
5.1 引張り試験結果	4
5.2 硬さ試験結果	5
5.3 シャルピー衝撃試験結果	5
5.4 破壊靱性試験結果	5
6. 結 論	6
謝 辞	7
参考文献	8
付録	
A 1. 試験片採取図	35
A 2. 引張り試験結果	35
A 3. シャルピー衝撃試験結果	35
A 4. 破壊靱性試験片への予亀裂導入条件	35
A 5. 破壊靱性試験結果	35
A 6. 走査電子顕微鏡による破面観察結果	35

Contents

1. Introduction	1
2. Mechanical Properties and Chemical Compositions of Test Material	2
3. Specimen Fabrication	2
4. Test Procedure	3
4.1 Tensile Test	3
4.2 Hardness Test	3
4.3 Charpy Impact Test	3
4.4 Fracture Toughness Test	3
5. Test Results and Discussion	4
5.1 Results of Tensile Test	4
5.2 Results of Hardness Test	5
5.3 Results of Charpy Impact Test	5
5.4 Results of Fracture Toughness Test	5
6. Conclusions	6
Acknowledgement	7
References	8
Appendix	
A 1. Specimen Cutting Diagram	35
A 2. Results of Tensile Test	35
A 3. Results of Charpy Impact Test	35
A 4. Condition of Precracking for Fracture Toughness Specimen	35
A 5. Results of Fracture Toughness Test	35
A 6. Results of Fracture Surface Observation	35

1. はしがき

研究炉の主な利用目的の中には回折・散乱実験や材料の照射試験等があり、炉心で発生する中性子を効率良く利用することが要求される。そのため、炉心部分の構造材は中性子経済に優れた性質を有することが必須であることに加えて強度、耐食性、加工性および溶接性に優れていることが要求される。これらの条件を満たす研究炉用炉心構造材として、A1100、A5052、A6061等の耐食アルミニウム合金があり、各々要求される強度レベルと溶接性に応じて使用されている。中でも、強度、耐食性および溶接性のバランスが取れているA5052合金の使用頻度が高い。今後も、アルミニウム合金の優れた材料特性から、研究炉用炉心構造材としての地位は変わらないと考えられる。

研究炉の炉心は高い中性子束下におかれるので、強度部材には耐中性子照射特性が要求される。一般に金属材料が中性子照射を受けた場合、ミクロ的な照射欠陥が生じる結果として強度が上昇し、延性および靱性が低下する。この現象を照射脆化と呼んでいる。

照射脆化を評価する場合、材料の破壊靱性値の低下が特に重要であるが、破壊力学評価手法が比較的近年体系化されたことや、研究炉は厳しい荷重条件にならないことから、これまで破壊靱性に関する照射試験データは取得されていない。

従来、アルミニウム合金は耐中性子照射特性が優れた構造材とされてきたが、ORNL等におけるアルミニウム合金の照射後引張り試験データから 10^{20} n/cm² ($E > 0.5$ MeV)を越える高速中性子照射を受けると著しい延性低下と強度上昇を生じることが明らかとなっている^{1)~4)}。これらの引張り試験の結果から、中性子照射により破壊靱性が低下することが予想される。

原研に設置されている研究炉は、昭和30年代に相ついで建設されており、30年以上の運転実績がある。JRR-3については改造が行われ新鋭の研究炉として利用運転されている。また、JRR-4は現在も順調に稼働を続けているが、JRR-2は平成8年末に停止された。

原研以外に設置されている研究炉についても昭和30年代に設置されたものが多く、我国の研究炉の多くは建設後30年以上経過している。これらの高経年研究炉の炉心構造材の経年劣化が今後問題になると考えられる。

その一方で将来の研究炉として超高中性子束炉のニーズも高まっている。このような動向を踏まえ、高性能新型研究炉の開発研究が原研でも進められている。高性能新型研究炉では、高中性子束・高熱流束炉心となることが予想される。この場合、炉心構造は厳しい中性子照射条件下に置かれるので、構造材の照射脆化、疲労、燃料クラッドの腐食等についてR&Dが必要になると考えられる。

米国では、将来の利用動向を見越した高性能研究炉の建造プロジェクト、ANS計画がORNLにおいて計画され、概念設計まで行われた実績がある⁵⁾。ANSでは、熱出力350 MW、出力密度8.8 MW/L、熱中性子束 $8 \sim 10 \times 10^{19}$ n/m² sの性能を目標に概念設計が行われた。炉心は、直径20インチの圧力管内に収納され、さらにその外側も容器で囲う二重容器構造が検討された。炉心圧力管は高温高圧水環境で使用され、構造設計にはASME Code Sec. IIIのクラス1コンポーネントの設計基準が適用される。そのため、延性破壊防止設計のほか低サイクル疲労

設計および脆性破壊防止設計が要求され、材料の低サイクル疲労データや破壊靱性の照射脆化データの取得が必要となる。さらに、フランスにおいても、SHIROE炉を廃炉にし、後継として照射炉の建設計画が検討された。

このような研究炉の運転管理状況や将来炉の動向から分かるように、今後、老朽化した研究炉の炉心構造の健全性評価や新型研究炉の開発に当たっては、材料の強度（機械的性質、疲労強度）、照射脆化（破壊靱性、衝撃値）、腐食等の材料データが不可欠であり、今後、これらのデータの取得、データベース整備および健全性評価手法の検討等のR&Dが必要と考えられる。

このような背景から、高性能新型研究炉の開発研究の一環として、アルミニウム合金の照射試験を進めた。本報告ではすでに完了したA5052-0 およびA6061-T6アルミニウム合金の母材および溶接継手材について非照射材の引張り試験、破壊靱性試験および衝撃試験の結果をまとめた。なお、照射試験についても、合計6キャプセルの照射試験および照射後試験を進めている。

2. 供試材の化学成分，機械的性質

本試験では、JRR-2, JRR-3, JRR-4 およびNSRRの炉心構造材として最も使用頻度が高いA5052-0 およびA6061-T6を試験対象に選定した。供試材には板材を使用することとし、1000mm×2000mm×20mmtの板材を購入し非照射材および照射材の試験に供した。

供試材のミルシートをTable 2.1 及びTable 2.2 に示す。Table 2.2 における材質規格のA6061-T651は、容体化処理後ストレッチ矯正を行い時効処理したものであり、T6処理と同等である。両材料について、溶接継手材の試験を行うため、溶接継手板を製作した。溶接法は、アルミニウム合金の接合に最も多く適用されるティグ溶接法を用いた。溶接板は20mmtの母板から330mm×100mmの短冊状の板を切り出し、中央にV開先を加工しV開先に溶接肉盛りした後裏から同様のV開先加工および溶接肉盛りを行い溶接板を製作した。A5052-0 およびA6061-T651とも同一の溶材を使用した。溶材のミルシートをTable 2.3 に示す。また、溶接条件をTable 2.4 及びTable 2.5 に示す。

3. 試験片製作

強度試験として引張り試験、シャルピー衝撃試験及び破壊靱性試験を実施した。また、各材料について硬さ測定も行った。照射キャプセルは外径の最大が約60mmφに制限されており、角型の破壊靱性試験片を照射できないので、破壊靱性試験片としてディスク形状の試験片（DCT: Disk-shaped Compact Specimen）を使用した。ASTM E813 基準⁶⁾にはDCT試験片の規定がないので、ASTM E399⁷⁾のDCT (Disk-shaped Compact Specimen)試験片を準用した。各試験片の形状をFig. 3.1 に示す。A5052 およびA6061 材の溶接継手試験片は上述の330mm×100mmの溶接継手板から切出した。試験片切出し図は付録に示す通りである。

設計および脆性破壊防止設計が要求され、材料の低サイクル疲労データや破壊靱性の照射脆化データの取得が必要となる。さらに、フランスにおいても、SHIROE炉を廃炉にし、後継として照射炉の建設計画が検討された。

このような研究炉の運転管理状況や将来炉の動向から分かるように、今後、老朽化した研究炉の炉心構造の健全性評価や新型研究炉の開発に当たっては、材料の強度（機械的性質、疲労強度）、照射脆化（破壊靱性、衝撃値）、腐食等の材料データが不可欠であり、今後、これらのデータの取得、データベース整備および健全性評価手法の検討等のR&Dが必要と考えられる。

このような背景から、高性能新型研究炉の開発研究の一環として、アルミニウム合金の照射試験を進めた。本報告ではすでに完了したA5052-0 およびA6061-T6アルミニウム合金の母材および溶接継手材について非照射材の引張り試験、破壊靱性試験および衝撃試験の結果をまとめた。なお、照射試験についても、合計6キャプセルの照射試験および照射後試験を進めている。

2. 供試材の化学成分，機械的性質

本試験では、JRR-2, JRR-3, JRR-4 およびNSRRの炉心構造材として最も使用頻度が高いA5052-0 およびA6061-T6を試験対象に選定した。供試材には板材を使用することとし、1000mm×2000mm×20mmtの板材を購入し非照射材および照射材の試験に供した。

供試材のミルシートをTable 2.1 及びTable 2.2 に示す。Table 2.2 における材質規格のA6061-T651は、容体化処理後ストレッチ矯正を行い時効処理したものであり、T6処理と同等である。両材料について、溶接継手材の試験を行うため、溶接継手板を製作した。溶接法は、アルミニウム合金の接合に最も多く適用されるティグ溶接法を用いた。溶接板は20mmtの母板から330mm×100mmの短冊状の板を切り出し、中央にV開先を加工しV開先に溶接肉盛りした後裏から同様のV開先加工および溶接肉盛りを行い溶接板を製作した。A5052-0 およびA6061-T651とも同一の溶材を使用した。溶材のミルシートをTable 2.3 に示す。また、溶接条件をTable 2.4 及びTable 2.5 に示す。

3. 試験片製作

強度試験として引張り試験、シャルピー衝撃試験及び破壊靱性試験を実施した。また、各材料について硬さ測定も行った。照射キャプセルは外径の最大が約60mmφに制限されており、角型の破壊靱性試験片を照射できないので、破壊靱性試験片としてディスク形状の試験片（DCT: Disk-shaped Compact Specimen）を使用した。ASTM E813 基準⁶⁾にはDCT試験片の規定がないので、ASTM E399⁷⁾のDCT (Disk-shaped Compact Specimen)試験片を準用した。各試験片の形状をFig. 3.1 に示す。A5052 およびA6061 材の溶接継手試験片は上述の330mm×100mmの溶接継手板から切出した。試験片切出し図は付録に示す通りである。

設計および脆性破壊防止設計が要求され、材料の低サイクル疲労データや破壊靱性の照射脆化データの取得が必要となる。さらに、フランスにおいても、SHIROE炉を廃炉にし、後継として照射炉の建設計画が検討された。

このような研究炉の運転管理状況や将来炉の動向から分かるように、今後、老朽化した研究炉の炉心構造の健全性評価や新型研究炉の開発に当たっては、材料の強度（機械的性質、疲労強度）、照射脆化（破壊靱性、衝撃値）、腐食等の材料データが不可欠であり、今後、これらのデータの取得、データベース整備および健全性評価手法の検討等のR&Dが必要と考えられる。

このような背景から、高性能新型研究炉の開発研究の一環として、アルミニウム合金の照射試験を進めた。本報告ではすでに完了したA5052-0 およびA6061-T6アルミニウム合金の母材および溶接継手材について非照射材の引張り試験、破壊靱性試験および衝撃試験の結果をまとめた。なお、照射試験についても、合計6キャプセルの照射試験および照射後試験を進めている。

2. 供試材の化学成分，機械的性質

本試験では、JRR-2, JRR-3, JRR-4 およびNSRRの炉心構造材として最も使用頻度が高いA5052-0 およびA6061-T6を試験対象に選定した。供試材には板材を使用することとし、1000mm×2000mm×20mmtの板材を購入し非照射材および照射材の試験に供した。

供試材のミルシートをTable 2.1 及びTable 2.2 に示す。Table 2.2 における材質規格のA6061-T651は、容体化処理後ストレッチ矯正を行い時効処理したものであり、T6処理と同等である。両材料について、溶接継手材の試験を行うため、溶接継手板を製作した。溶接法は、アルミニウム合金の接合に最も多く適用されるティグ溶接法を用いた。溶接板は20mmtの母板から330mm×100mmの短冊状の板を切り出し、中央にV開先を加工しV開先に溶接肉盛りした後裏から同様のV開先加工および溶接肉盛りを行い溶接板を製作した。A5052-0 およびA6061-T651とも同一の溶材を使用した。溶材のミルシートをTable 2.3 に示す。また、溶接条件をTable 2.4 及びTable 2.5 に示す。

3. 試験片製作

強度試験として引張り試験、シャルピー衝撃試験及び破壊靱性試験を実施した。また、各材料について硬さ測定も行った。照射キャプセルは外径の最大が約60mmφに制限されており、角型の破壊靱性試験片を照射できないので、破壊靱性試験片としてディスク形状の試験片（DCT: Disk-shaped Compact Specimen）を使用した。ASTM E813 基準⁶⁾にはDCT試験片の規定がないので、ASTM E399⁷⁾のDCT (Disk-shaped Compact Specimen)試験片を準用した。各試験片の形状をFig. 3.1 に示す。A5052 およびA6061 材の溶接継手試験片は上述の330mm×100mmの溶接継手板から切出した。試験片切出し図は付録に示す通りである。

4. 試験方法

4. 1 引張り試験

引張り試験は、JIS Z-2241に準拠し、0.2%耐力、引張り強さ、伸びを求めた。試験機のロードセルとクロスヘッド変位の記録から破断までの荷重-変位曲線を得た。応力-歪線図は、約1%まで求めた。試験温度は、室温、100℃、150℃、200℃とした。

4. 2 硬さ試験

硬さ試験は、JIS Z-2244に準拠し、ビッカース硬度を測定した。硬さ計として、マイクロビッカース硬さ計を用いた。測定条件は、荷重500gf、保持時間15secである。A5052母材とA6061母材について、室温で試験を行った。破損したシャルピー試験片を使用し、試験片の長手方向に1mm間隔で8点測定した。

4. 3 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験は、JIS Z-2242に準拠し、吸収エネルギー、衝撃値、横膨出量、延性破面率のデータを取得した。A5052母材についてのみ、試験温度を室温、100℃、150℃、200℃とし、他の材料については室温試験のみ実施した。

4. 4 破壊靱性試験

破壊靱性試験は、ASTM E813-89に準拠し、以下のように行った。なお、A5052母材については、サイドグループ付きとサイドグループ無しの試験を行い、他の試験についてはすべてサイドグループ付きで試験した。

(1) 破壊靱性試験片への疲労予亀裂の導入

破壊靱性試験片への疲労予亀裂導入はASTM E813に従って荷重条件を設定し、疲労試験機により片振り荷重を付与して行った。荷重条件は外面で測定した予亀裂長さが0.5mmまでは最大荷重260kgf、1.7mmまでは最大荷重230kgfとした。疲労亀裂を拡大鏡により観察しながら所定寸法に達するまで疲労荷重を負荷した。表面の目標値を1.7mmとし、表裏の差が±0.2mm以内となるように試験機を調整しながら導入した。いくつかの試験片についてはこの範囲をこえていた。各試験片の予亀裂導入条件および予亀裂長さは付録に示す通りである。

予亀裂導入後、サイドグループ付き試験片については深さ1.6mm、R=1.6mm、角度45°のサイドグループを機械ノッチの延長上に加工した。

(2) 亀裂進展試験

亀裂進展試験は、引張り試験機により行った。クロスヘッド速度を0.5mm/分とし、試験中20~30回除荷コンプライアンスを測定した。試験温度は、室温、100℃、150℃、200℃である。各温度条件で3個の試験を実施した。高温試験は、プレートヒータを2枚使用し、0.3mmφの熱伝対を

表裏にスポット溶接して行った。変位測定には、測定範囲12mm、精度 0.1%以上のクリップゲージを使用した。除荷コンプライアンスを含む変位-荷重曲線は、12ビットのA/D コンバータを介してパソコンに収録した。

(3) 安定亀裂進展量測定

亀裂進展試験後、疲労荷重を負荷し破面分離した。さらに、E813基準に従いサイドグループ部の板幅を8等分し、疲労予亀裂長さ (a_0) と安定亀裂成長量 (Δa) を測定した。

(4) 破壊靱性値の決定

上記で得られた亀裂進展抵抗曲線 (J- Δa 曲線) に基づき、E813基準に従ってJ- Δa 曲線と $\Delta a=0.15\text{mm}$ のオフセット直線の交点を求め、 J_0 を得た。さらに、得られた J_0 値が試験片寸法基準をほぼ満足した場合について、有効な破壊靱性 J_{Ic} (試験片寸法条件を満足する有効な破壊靱性値) とした。なお、A6061 母材については、安定亀裂成長が非常に小さく最大荷重の直後に荷重が急激に低下し亀裂が不安定に成長したので他の材料のように亀裂進展抵抗曲線が得られなかった。そのため、A6061 母材については J_0 が求められないので、E399の基準により最大荷重から K_0 を求めさらに J_0 に換算した。

照射材も含めた引張り試験、シャルピー衝撃試験、破壊靱性試験の試験マトリックスをTable 4.1~Table 4.3 に示す。

5. 試験結果と考察

5.1 引張り試験結果

Fig. 5.1に引張り強さと0.2%耐力の測定結果を示す。試験に供した4材料、すなわち、A5052母材、A5052溶接継手、A6061母材、A6061溶接継手の内、A6061母材は他の材料に比べ顕著に強度が高い。他の3材料は引張り強さ、耐力とも同等の強さを有している。

A6061母材の耐力は引張り強さの95%前後に達し、極めて硬化が大きい材料といえる。また、温度が高いほど、耐力は引張り強さに近づく傾向がある。この材料では、耐力および引張り強さとも温度とともに漸減し、200℃の強さは室温の強さに比べ約85%に低下する。

他の3材料の引張り強さについては、A6061母材と同様に温度とともに漸減する。しかし、耐力については、200℃までの温度範囲では低下しない。また、耐力は引張り強さの1/2程度であり構造材として耐力と引張り強さのバランスが適切である。

溶接継手については、A5052とA6061の両方とも同一の溶加材を使用しているので、ほぼ同様の強さであった。

Fig. 5.2に伸びおよびしぼりの測定結果を示す。しぼりについては、A5052母材の150℃と200℃以外は60%前後である。A5052母材の150℃と200℃については温度とともに大きくなっ

表裏にスポット溶接して行った。変位測定には、測定範囲12mm、精度 0.1%以上のクリップゲージを使用した。除荷コンプライアンスを含む変位-荷重曲線は、12ビットのA/D コンバータを介してパソコンに収録した。

(3) 安定亀裂進展量測定

亀裂進展試験後、疲労荷重を負荷し破面分離した。さらに、E813基準に従いサイドグループ部の板幅を8等分し、疲労予亀裂長さ (a_0) と安定亀裂成長量 (Δa) を測定した。

(4) 破壊靱性値の決定

上記で得られた亀裂進展抵抗曲線 (J- Δa 曲線) に基づき、E813基準に従ってJ- Δa 曲線と $\Delta a=0.15\text{mm}$ のオフセット直線の交点を求め、 J_0 を得た。さらに、得られた J_0 値が試験片寸法基準をほぼ満足した場合について、有効な破壊靱性 J_{Ic} (試験片寸法条件を満足する有効な破壊靱性値) とした。なお、A6061 母材については、安定亀裂成長が非常に小さく最大荷重の直後に荷重が急激に低下し亀裂が不安定に成長したので他の材料のように亀裂進展抵抗曲線が得られなかった。そのため、A6061 母材については J_0 が求められないので、E399の基準により最大荷重から K_0 を求めさらに J_0 に換算した。

照射材も含めた引張り試験、シャルピー衝撃試験、破壊靱性試験の試験マトリックスをTable 4.1~Table 4.3 に示す。

5. 試験結果と考察

5.1 引張り試験結果

Fig. 5.1に引張り強さと0.2%耐力の測定結果を示す。試験に供した4材料、すなわち、A5052母材、A5052溶接継手、A6061母材、A6061溶接継手の内、A6061母材は他の材料に比べ顕著に強度が高い。他の3材料は引張り強さ、耐力とも同等の強さを有している。

A6061母材の耐力は引張り強さの95%前後に達し、極めて硬化が大きい材料といえる。また、温度が高いほど、耐力は引張り強さに近づく傾向がある。この材料では、耐力および引張り強さとも温度とともに漸減し、200℃の強さは室温の強さに比べ約85%に低下する。

他の3材料の引張り強さについては、A6061母材と同様に温度とともに漸減する。しかし、耐力については、200℃までの温度範囲では低下しない。また、耐力は引張り強さの1/2程度であり構造材として耐力と引張り強さのバランスが適切である。

溶接継手については、A5052とA6061の両方とも同一の溶加材を使用しているので、ほぼ同様の強さであった。

Fig. 5.2に伸びおよびしぼりの測定結果を示す。しぼりについては、A5052母材の150℃と200℃以外は60%前後である。A5052母材の150℃と200℃については温度とともに大きくなっ

た。伸びについては、A5052 母材が最も大きく室温で30%であり、100 °C以上になると顕著に増大する。溶接材については、室温から200 °Cの温度範囲で10~20%であり、温度依存性は見られない。A6061 母材については、室温から200 °Cの温度範囲で 5%程度の極めて小さな伸びを示し、延性が小さな材料であることが分かる。

なお、引張り試験結果の表を付録に示す。

5. 2 硬さ試験結果

硬さ試験は、A5052 母材とA6061 母材について行った。結果をTable 5.1 に示す。室温におけるビッカース硬さの平均値は、A5052 母材でHv= 60.6, A6061 母材でHv=113.2であり、強さの傾向と一致する。

5. 3 シャルピー衝撃試験結果

Fig. 5.3 にシャルピー衝撃試験の結果をまとめる。温度依存性について試験したA5052 母材の結果から分かるように、吸収エネルギーおよび横膨出量とも温度依存性は見られない。吸収エネルギーおよび横膨出量のいずれもA6061 母材が最小でA5052 母材が最大である。溶接継手材については、引張り試験結果と同様に、A5052 溶接継手材およびA6061 溶接継手材とも同等の吸収エネルギーおよび横膨出量を有し、また、A6061 母材より若干大きな吸収エネルギーおよび横膨出量を有する。なお、延性破面率はすべて 100%であった。

5. 4 破壊靱性試験結果

破壊靱性試験で得られた、A5052 母材（サイドグループ無しおよび有り）、A5052 溶接継手、A6061 溶接継手の室温における荷重-変位曲線および亀裂進展抵抗曲線の例をFig. 5.4 ~Fig. 5.7 に示す。また、Fig. 5.8 に A6061母材の荷重-変位曲線の例を示す。A6061 母材については、前述のように、最大荷重の直後に荷重が急激に低下し亀裂が不安定に成長し亀裂進展抵抗曲線が得られなかったため、E399の基準により最大荷重から K_{Qc} を求め J_{Qc} に換算した。

Fig. 5.4 は、A5052 母材のサイドグループ無しの場合、Fig. 5.5 はサイドグループ付きの場合であり、後述するようにいずれも有効な破壊靱性が得られていないが、サイドグループの導入により変位が約2/3 に低下する。荷重については、サイドグループによる断面積の減少分を補正すれば同程度である。

一方、サイドグループ付きのA5052 母材、A5052 溶接継手、A6061 溶接継手試験片の荷重-変位曲線および亀裂進展抵抗曲線を示したFig. 5.5 とFig. 5.6, Fig. 5.7 を比較して明らかなように、各材料とも最大荷重はほぼ同じであるが、変位量はA5052 母材が溶接継手の約2倍程度であり、これは靱性が高いことを反映している。さらに、Fig. 5.8 に示すA6061 母材の荷重-変位曲線では、荷重は他に比べて若干高く、変位は他より小さく、靱性の低い材料であることが分かる。また、荷重-変位曲線にほとんど塑性変形領域が生じること無く直線的に荷重増加して最大荷重に達する。また、安定亀裂成長もほとんど生じることなく、最大荷重直後に亀裂が急速進展した。

次にFig. 5.9 は A5052材母材の200 °Cにおける母材の荷重-変位曲線と亀裂進展抵抗曲線の例である。図から明らかなように、200 °Cの場合は亀裂進展抵抗曲線が鈍化直線の延長上にあり

J_0 値が定まらない。

Fig. 5.10にA5052 母材のサイドグループ付きおよびサイドグループ無しの破壊靱性値を比較する。A5052 母材の場合はいずれも有効な破壊靱性は得られなかった。付録に示す結果のまとめから分かるように、サイドグループ付き試験片の室温と 100℃の結果は有効条件を満たすりガメント (b_0) と実肉厚 (B_N) の要求値は試験片寸法の1.5 ~2 倍程度であるので、約2 倍程度の試験片により有効な J_{1c} が得られると推定される。A5052母材の室温と 100℃の J_0 値は、約15 kgf/mm程度であり、この値は後述する A5052溶接部の有効な J_{1c} の約2 倍程度である。従って、A5052母材の室温と 100℃の破壊靱性 J_{1c} は、A5052溶接部の J_{1c} とこの J_0 の中間にある。

次に、Fig. 5.11は、サイドグループ付きのA5052 母材、A5052 溶接継手、A6061 溶接継手、A6061 溶接継手の破壊靱性値をまとめたものである。同図において黒ヌキの記号は非有効な破壊靱性、白ヌキの記号は、ASTM E813 の板厚とりガメント幅の基準をほぼ満足する有効な破壊靱性である。なお、A6061 母材については、E399基準により K_0 をもとめ J_0 に換算した。

A5052 母材については、上述のように有効な破壊靱性が得られず、靱性が最も高い。一方、溶接継手材については100 °Cまでは、A5052 とA6061 の両方とも $J_{1c}=4\sim 7$ kgf/mm程度の有効な破壊靱性値が得られた。しかし、100 °Cを越えると有効な破壊靱性が得られなかった。通常、鋼材の破壊靱性 J_{1c} は延性破壊温度領域で10kgf/mm以上あるので、溶接部の破壊靱性は鋼材の1/2 程度である。

A6061 母材については、200 °Cまでの温度範囲で $J_{1c}=1\sim 1.5$ kgf/mm 程度の極めて低い破壊靱性を有することが分かる。A6061 合金についてはORNLのデータ⁸⁾でも1.2kgf/mm 程度とされており、構造材としては極めて破壊靱性が小さい。鋼材に比べ約1桁程度低い破壊靱性であり、A6061合金を強度部材として使用する場合、非延性破壊を防止するため十分な注意が必要である。

Fig. 5.12は、シャルピー撃試験と破壊靱性試験の室温試験結果を用いて、破壊靱性値との相関を調べたものである。図から明らかなようにシャルピー吸収エネルギーおよび横膨出量とも概ね破壊靱性値との相関が認められる。

6. 結 論

本報告書では、研究炉用アルミニウム合金の照射試験の一環として実施したA5052 母材、A5052溶接継手、A6061 溶接継手およびA6061 母材の非照射材の強度試験の結果についてまとめた。強度試験として、引張り試験、シャルピー衝撃試験および、破壊靱性試験を実施し、さらに走査電子顕微鏡による破面の微視的様相の観察も行った。得られた結果は概ね以下の通りである。

(1)引張り試験結果：

- A5052 母材、A5052 溶接継手およびA6061 溶接継手は同等の耐力と引張り強さを有し、それぞれ $8\sim 10$ kgf/mm² および $13\sim 20$ kgf/mm² 程度である。また、引張り強さについては 200°C までの温度範囲で漸減の傾向がある。
- A6061母材は他の材料より 2倍程度の強度を有する。耐力と引張り強さの差が極めて小さく、

J_0 値が定まらない。

Fig. 5. 10にA5052 母材のサイドグループ付きおよびサイドグループ無しの破壊靱性値を比較する。A5052 母材の場合はいずれも有効な破壊靱性は得られなかった。付録に示す結果のまとめから分かるように、サイドグループ付き試験片の室温と 100℃の結果は有効条件を満たすりガメント (b_0) と実肉厚 (B_N) の要求値は試験片寸法の1.5 ~2 倍程度であるので、約2 倍程度の試験片により有効な J_{Ic} が得られると推定される。A5052母材の室温と 100℃の J_0 値は、約15 kgf/mm程度であり、この値は後述する A5052溶接部の有効な J_{Ic} の約2 倍程度である。従って、A5052母材の室温と 100℃の破壊靱性 J_{Ic} は、A5052溶接部の J_{Ic} とこの J_0 の中間にある。

次に、Fig. 5. 11は、サイドグループ付きのA5052 母材、A5052 溶接継手、A6061 溶接継手、A6061 溶接継手の破壊靱性値をまとめたものである。同図において黒ヌキの記号は非有効な破壊靱性、白ヌキの記号は、ASTM E813 の板厚とリガメント幅の基準をほぼ満足する有効な破壊靱性である。なお、A6061 母材については、E399基準により K_0 をもとめ J_0 に換算した。

A5052 母材については、上述のように有効な破壊靱性が得られず、靱性が最も高い。一方、溶接継手材については100 °Cまでは、A5052 とA6061 の両方とも $J_{Ic}=4\sim 7$ kgf/mm程度の有効な破壊靱性値が得られた。しかし、100 °Cを越えると有効な破壊靱性が得られなかった。通常、鋼材の破壊靱性 J_{Ic} は延性破壊温度領域で10kgf/mm以上あるので、溶接部の破壊靱性は鋼材の1/2 程度である。

A6061 母材については、200 °Cまでの温度範囲で $J_{Ic}=1\sim 1.5$ kgf/mm 程度の極めて低い破壊靱性を有することが分かる。A6061 合金についてはORNLのデータ⁸⁾でも1.2kgf/mm 程度とされており、構造材としては極めて破壊靱性が小さい。鋼材に比べ約1桁程度低い破壊靱性であり、A6061合金を強度部材として使用する場合、非延性破壊を防止するため十分な注意が必要である。

Fig. 5. 12は、シャルピー撃試験と破壊靱性試験の室温試験結果を用いて、破壊靱性値との相関を調べたものである。図から明らかなようにシャルピー吸収エネルギーおよび横膨出量とも概ね破壊靱性値との相関が認められる。

6. 結 論

本報告書では、研究炉用アルミニウム合金の照射試験の一環として実施したA5052 母材、A5052溶接継手、A6061 溶接継手およびA6061 母材の非照射材の強度試験の結果についてまとめた。強度試験として、引張り試験、シャルピー衝撃試験および、破壊靱性試験を実施し、さらに走査電子顕微鏡による破面の微視的様相の観察も行った。得られた結果は概ね以下の通りである。

(1)引張り試験結果：

- A5052 母材、A5052 溶接継手およびA6061 溶接継手は同等の耐力と引張り強さを有し、それぞれ $8\sim 10$ kgf/mm² および $13\sim 20$ kgf/mm² 程度である。また、引張り強さについては 200°Cまでの温度範囲で漸減の傾向がある。
- A6061母材は他の材料より 2倍程度の強度を有する。耐力と引張り強さの差が極めて小さく、

引張り強さは25~30kgf/mm²である。また、室温から200℃の間では、引張り強さと耐力とも漸減する。伸びが5%程度で極めて小さな延性しか有しない。

(2)シャルピー衝撃試験結果：

- A5052 母材について室温から200℃の範囲で、吸収エネルギーおよび横膨出量の温度依存性は小さい。
- 各材料ともすべて延性破面率は100%であるが、A6061母材の吸収エネルギーと横膨出量は約1.8kgfm および0.6mm で極めて小さい。A5052 母材では吸収エネルギーが約8kgfm、横膨出量が約2.9mm であった。A5052 溶接継手およびA6061 溶接継手は、A6061母材を上回るがA5052 母材よりかなり低い。

(3)破壊靱性試験結果：

- A5052 母材については、室温から200℃の温度範囲で高い靱性を有しており、有効基準(試験片寸法に関する有効性判定基準を満たす破壊靱性:Valid J_{IC})を満足する破壊靱性値が得られなかった。母材の J_{IC} は、溶接部を上回ると推定されるが、 J_{IC} を求めるには約2倍程度の試験片寸法が必要である。
- 溶接材については、引張り試験結果と同様にA5052 とA6061 は同程度の靱性を有する。室温から100℃の範囲で、概ね、有効な破壊靱性が得られ、その値はA5052 およびA6061 溶接継手のいずれも $J_{IC}=4\sim 7\text{kgf/mm}$ ($K_{Jc}=200\sim 250\text{ kgf/mm}^{3/2}$) である。150℃以上では有効な破壊靱性が得られなかった。従って、この温度範囲では室温に比べ亀裂の存在に対する破壊感受性は低い。鋼材の破壊靱性は通常10kgf/mm ($K_{Jc}=500\text{kgf/mm}^{3/2}$) 以上あるので、A5052 溶接部については靱性の低い鋼材をやや下回る破壊靱性値を有している。
- A6061 母材については、安定亀裂成長がほとんどなく最大荷重から急激に延性破壊が発生する。そのため、ASTM E399 の基準を適用し、 J_{IC} を求めた。その結果、 $J_{IC}=1\sim 1.5\text{kgf/mm}$ ($K_{Jc}=90\sim 110\text{ kgf/mm}^{3/2}$) と極めて低靱性であることが分かった。ORNLのデータ⁸⁾でもA6061 母材の靱性は1.2kgf/mm 程度とされており、この値は鋼材の10%程度の破壊靱性である。従って、A6061母材を強度部材として使用する場合、割れが発生しないよう十分な管理を行い非延性破壊防止に注意が必要と思われる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、白井英次前安全管理室長（現在、(財)放射線利用振興協会東海事業所長）、一色正彦研究炉部長、高柳政二研究炉部次長、川崎稔元研究炉部長（現在、(財)放射線利用振興協会専務理事・国際原子力技術協力センター長）ならびに大西信秋前研究炉部長（現在、(株)アトックス茨城事務所長）よりご協力と励ましをいただいた。また、研究炉技術開発室の室員各位には試験実施にあたりご協力を賜った。各位には謝意を表します。

引張り強さは25~30kgf/mm²である。また、室温から200℃の間では、引張り強さと耐力とも漸減する。伸びが5%程度で極めて小さな延性しか有しない。

(2)シャルピー衝撃試験結果：

- A5052 母材について室温から200℃の範囲で、吸収エネルギーおよび横膨出量の温度依存性は小さい。
- 各材料ともすべて延性破面率は100%であるが、A6061母材の吸収エネルギーと横膨出量は約1.8kgfm および0.6mm で極めて小さい。A5052 母材では吸収エネルギーが約8kgfm、横膨出量が約2.9mm であった。A5052 溶接継手およびA6061 溶接継手は、A6061母材を上回るがA5052 母材よりかなり低い。

(3)破壊靱性試験結果：

- A5052 母材については、室温から200℃の温度範囲で高い靱性を有しており、有効基準(試験片寸法に関する有効性判定基準を満たす破壊靱性:Valid J_{1c})を満足する破壊靱性値が得られなかった。母材の J_{1c} は、溶接部を上回ると推定されるが、 J_{1c} を求めるには約2倍程度の試験片寸法が必要である。
- 溶接材については、引張り試験結果と同様にA5052 とA6061 は同程度の靱性を有する。室温から100℃の範囲で、概ね、有効な破壊靱性が得られ、その値はA5052 およびA6061 溶接継手のいずれも $J_{1c}=4\sim 7\text{kgf/mm}$ ($K_{Jc}=200\sim 250\text{kgf/mm}^{3/2}$)である。150℃以上では有効な破壊靱性が得られなかった。従って、この温度範囲では室温に比べ亀裂の存在に対する破壊感受性は低い。鋼材の破壊靱性は通常10kgf/mm($K_{Jc}=500\text{kgf/mm}^{3/2}$)以上あるので、A5052 溶接部については靱性の低い鋼材をやや下回る破壊靱性値を有している。
- A6061 母材については、安定亀裂成長がほとんどなく最大荷重から急激に延性破壊が発生する。そのため、ASTM E399 の基準を適用し、 J_{1c} を求めた。その結果、 $J_{1c}=1\sim 1.5\text{kgf/mm}$ ($K_{Jc}=90\sim 110\text{kgf/mm}^{3/2}$)と極めて低靱性であることが分かった。ORNLのデータ⁸⁾でもA6061 母材の靱性は1.2kgf/mm 程度とされており、この値は鋼材の10%程度の破壊靱性である。従って、A6061母材を強度部材として使用する場合、割れが発生しないよう十分な管理を行い非延性破壊防止に注意が必要と思われる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、白井英次前安全管理室長(現在、(財)放射線利用振興協会東海事業所長)、一色正彦研究炉部長、高柳政二研究炉部次長、川崎稔元研究炉部長(現在、(財)放射線利用振興協会専務理事・国際原子力技術協力センター長)ならびに大西信秋前研究炉部長(現在、(株)アトックス茨城事務所長)よりご協力と励ましをいただいた。また、研究炉技術開発室の室員各位には試験実施にあたりご協力を賜った。各位には謝意を表します。

参考文献

- 1) K. Farrel and A. E. Richt: Post Irradiation Properties of the 6061-T6 Aluminum High Flux Isotope Reactor Hydraulic Tube, ASTM STP 570, 1975, pp311-325
- 2) K. Farrel and A. E. Richt: Microstructure and Tensile Properties of Heavily irradiated 1100-O Aluminum, ASTM STP 683, 1979, pp427-439
- 3) K. Farrel and R. T. King: Tensile Properties of Neutron Irradiated 6061 Aluminum Alloy in Annealed and Precipitation-Hardened Conditions, ASTM STP 683, 1979, pp440-449
- 4) K. Farrel: Microstructure and Tensile Properties of Heavily Irradiated 5052-O Aluminum Alloy, Jour. of Nucl. Mat's, Vol. 97, 1981, pp33-43
- 5) F. J. Perez et al. : Conceptual Design Summary, ORNL/TM-12184, September 1992
- 6) Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness, ASTM E-813-89
- 7) Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials ASTM E-399-83
- 8) C. D. West: Status of the Advanced Neutron Source(ANS), June 10, 1990, (Private Communication)

Table 2.1 A5052-0アルミ合金板材のミルシート

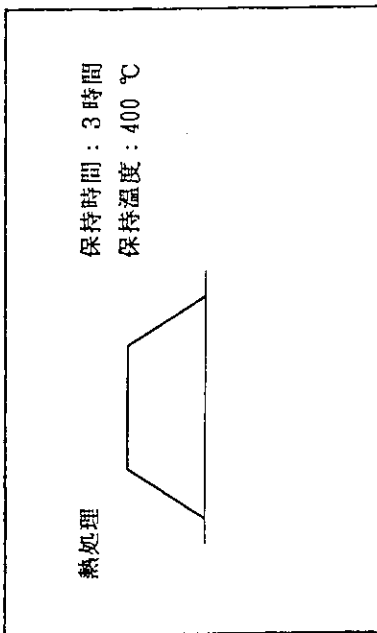
規格	種類・質別	寸法 (mm)	枚数	質量 (kg)						
JIS H4000	A5052P-H112	20. X 1000. X 2000.	12	1297.2						
項目 規格値	引張試験									
製作番号 35979-016	引張強さ (kgf/mm ²) MIN. 18 21 伸び (%) MIN. 12 37									
項目 規格値	化学成分 (%)									
製作番号 35979-016	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	その他 合計	Al
	MAX. 0.25	MAX. 0.40	MAX. 0.10	MAX. 0.10	2.2 - 2.8	0.15 - 0.55	MAX. 0.10	-	MAX. 0.05	RE.
	0.10	0.27	0.03	0.05	2.44	0.19	Tir.	0.01	NORMAL	RE.

Table 2.2 A6061-T6 1 アルミ合金板材のミルシート

ALUMINIUM ALLOY PLATE						
DIMENSIONS:	QUANTITY	THICK	WIDTH	LENGTH	NET WEIGHT	
	5 PLATES	20.000 MM	1500.00 MM	3000.00 MM	1218.00 KGS	
International alloy code : 6061, 焼入れ : 516°C ~ 550°C, 水冷						
Specification : 6061 T651 ASIA, 時硬 : 170°C ~ 180°C, 7.5 ~ 8.5hr						
T651 SOL.TREATED, CONTROL STRETCHED, PRECIPITATED						
OVERALL MARK.						
	Test No	No. Plates		Case No.		
	2869001	2		10621		
	2869002	3		10621		
Analysis :						
Cast Number	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn
8E777102	.29	.20	.95	.11	.60	.03
	Ti	Cr Totl	Othrs			
	.040	.19	.02			
Tensile Properties :						
Test No	Cast number	Test Direction and Pos'n	Gauge Length (D)	0.2% Proof Stress (MPa)	Ultimate Stress (MPa)	Elong-ation (%)
2869001	8E777102	LTAC.5W	5.00	281	308	12.1
				28.6	31.4	(KG/SQ MM)
2869002	8E777102	LTAC.5W	5.00	277	309	12.9
				28.2	31.5	(KG/SQ MM)

Table 2.3 A5052-0材および A6061-T651 材の溶接継手用溶材 A5356BYのミルシート

Standard based on JIS Z3232

Alloy	A5356BY	
Diameter (mm ϕ)	3.2	
Weight (kg)	5	
Lot No.	51023 557	
Shipping Date	92.12.01	

WELDING TEST		
Item	Standard	Lot No. Lot No.
Tensile (N/mm ²)	265.0 _{min}	51023 557 299.0
Bending	-	GOOD

CHEMICAL COMPOSITION				%
Elements	Standard	Lot No.	Lot No.	Lot No.
Cu	0.10 MAX	51023 557	0.010	
Si	0.25 MAX	0.080		
Fe	0.40 MAX	0.160		
Mn	0.05~0.20	0.100		
Mg	4.5 ~ 5.5	4.930		
Zn	0.10 MAX	0.010		
Cr	0.05~0.20	0.090		
Ti	0.06~0.20	0.090		
other				
each	0.05 MAX	-	-	-
total	0.15 MAX	-	-	-
Al	RE	RE		

Table 2.4 A5052-O材溶接継手板の溶接条件

1. 溶接継手寸法	100W×330L×20t
2. 溶接方法	GTAW
3. 溶接姿勢	下向
4. 溶加材材質	A5356BY
5. 溶加材直径	φ3.2
6. 溶加材チャージNo.	788
7. シールドガスの種類, 流量	アルゴンガス 10ml
8. 後熱処理	なし
9. 電極の種類	トリウム入りタングステン
10. 電極の直径	φ3
11. 電極の極性	陰極
12. 電流・電圧	150~170A
13. 積層方法	片面25層

Table 2.5 A6061-T651材溶接継手板の溶接条件

1. 溶接継手寸法	100W×330L×20t
2. 溶接方法	GTAW
3. 溶接姿勢	下向溶接
4. 溶加材材質	A5356BY
5. 溶加材直径	φ3.2
6. 溶加材チャージNo.	788
7. シールドガスの種類, 流量	Arガス 12ml/min
8. 後熱処理	なし
9. 電極の種類	トリウム入りタングステン
10. 電極の直径	3.0mm
11. 電極の極性	陰極
12. 電流・電圧	150A, 200V
13. 積層方法	16層

Table 4.1 (1/3) 引張り試験マトリックス

No.	材料	母/溶接	試験片	試験温度	照射サイクル	照射量	キャセル	備考
(92.1- 92.7, 5サイクル照射)								
T1	A5052	母材	T	RT	5	10^{21}	1	
T2	A5052	母材	T	RT	5	10^{21}	1	
T3	A5052	母材	T	100	5	10^{21}	1	
T4	A5052	母材	T	100	5	10^{21}	1	
T5	A5052	母材	T	150	5	10^{21}	1	
T6	A5052	母材	T	150	5	10^{21}	1	
T7	A5052	母材	T	200	5	10^{21}	1	
T8	A5052	母材	T	200	5	10^{21}	1	
T9	A5052	母材	T	200	5	$.5 \times 10^{21}$	1	
T10	A5052	母材	T	200	5	$.5 \times 10^{21}$	1	
T11	A5052	母材	T	200	5	$.5 \times 10^{21}$	1	
T12	A5052	母材	T	200	5	$.5 \times 10^{21}$	1	
(非照射材試験 92.3実施)								
T13	A5052	母材	T	RT	—	—	—	
T14	A5052	母材	T	RT	—	—	—	
T15	A5052	母材	T	100	—	—	—	
T16	A5052	母材	T	100	—	—	—	
T17	A5052	母材	T	150	—	—	—	
T18	A5052	母材	T	150	—	—	—	
T19	A5052	母材	T	200	—	—	—	
T20	A5052	母材	T	200	—	—	—	
(94.3- 94.4, 1サイクル照射)								
5T1	A5052	母材	T	RT	1	2×10^{20}	3	
5T2	A5052	母材	T	RT	1	2×10^{20}	3	
5T3	A5052	母材	T	150	1	2×10^{20}	3	
5T4	A5052	母材	T	150	1	2×10^{20}	3	
5T5	A5052	母材	T	RT	1	10^{20}	3	
5T6	A5052	母材	T	RT	1	10^{20}	3	
5T7	A5052	母材	T	150	1	10^{20}	3	
5T8	A5052	母材	T	150	1	10^{20}	3	
(93.3- 94.1, 5サイクル照射)								
5TW1	A5052	溶接	T	RT	5	10^{21}	2	
5TW2	A5052	溶接	T	RT	5	10^{21}	2	
5TW3	A5052	溶接	T	150	5	10^{21}	2	
5TW4	A5052	溶接	T	150	5	10^{21}	2	
5TW5	A5052	溶接	T	RT	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
5TW6	A5052	溶接	T	RT	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
5TW7	A5052	溶接	T	150	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
5TW8	A5052	溶接	T	150	5	$.5 \times 10^{21}$	2	

Table 4.1 (2/3) 引張り試験マトリックス

(94.3- 94.4, 1 サイクル照射)								
5TW9	A5052	溶接	T	RT	1	2×10^{20}	3	
5TW10	A5052	溶接	T	RT	1	2×10^{20}	3	
5TW11	A5052	溶接	T	150	1	2×10^{20}	3	
5TW12	A5052	溶接	T	150	1	2×10^{20}	3	
5TW13	A5052	溶接	T	RT	1	10^{20}	3	
5TW14	A5052	溶接	T	RT	1	10^{20}	3	
5TW15	A5052	溶接	T	150	1	10^{20}	3	
5TW16	A5052	溶接	T	150	1	10^{20}	3	
(非照射材試験 93.3実施)								
5TW17	A5052	溶接	T	RT	—	—	—	
5TW18	A5052	溶接	T	RT	—	—	—	
5TW19	A5052	溶接	T	100	—	—	—	
5TW20	A5052	溶接	T	100	—	—	—	
5TW21	A5052	溶接	T	150	—	—	—	
5TW22	A5052	溶接	T	150	—	—	—	
5TW23	A5052	溶接	T	200	—	—	—	
5TW24	A5052	溶接	T	200	—	—	—	
(93.3- 94.1, 5 サイクル照射)								
6T1	A6061	母材	T	RT	5	10^{21}	2	
6T2	A6061	母材	T	RT	5	10^{21}	2	
6T3	A6061	母材	T	150	5	10^{21}	2	
6T4	A6061	母材	T	150	5	10^{21}	2	
6T5	A6061	母材	T	RT	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
6T6	A6061	母材	T	RT	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
6T7	A6061	母材	T	150	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
6T8	A6061	母材	T	150	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
(非照射材試験 93.3実施)								
6T9	A6061	母材	T	RT	—	—	—	
6T10	A6061	母材	T	RT	—	—	—	
6T11	A6061	母材	T	100	—	—	—	
6T12	A6061	母材	T	100	—	—	—	
6T13	A6061	母材	T	150	—	—	—	
6T14	A6061	母材	T	150	—	—	—	
6T15	A6061	母材	T	200	—	—	—	
6T16	A6061	母材	T	200	—	—	—	

Table 4.1 (3/3) 引張り試験マトリックス

(非照射材試験 94.3実施)								
6TW1	A6061	溶接	T	RT	—	—	—	
6TW2	A6061	溶接	T	RT	—	—	—	
6TW3	A6061	溶接	T	100	—	—	—	
6TW5	A6061	溶接	T	100	—	—	—	
6TW7	A6061	溶接	T	150	—	—	—	
6TW8	A6061	溶接	T	150	—	—	—	
6TW9	A6061	溶接	T	200	—	—	—	
6TW10	A6061	溶接	T	200	—	—	—	

Table 4.2 (1/2) シャルピー衝撃試験マトリックス

No.	材料	母/溶接	試験片	試験温度	照射サイクル	照射量	キャセル	備考
(92.1- 92.7, 5サイクル照射)								
C1	A5052	母材	C	RT	5	10^{21}	1	
C2	A5052	母材	C	RT	5	10^{21}	1	
C3	A5052	母材	C	100	5	10^{21}	1	
C4	A5052	母材	C	100	5	10^{21}	1	
C5	A5052	母材	C	150	5	10^{21}	1	
C6	A5052	母材	C	150	5	10^{21}	1	
C7	A5052	母材	C	200	5	10^{21}	1	
C8	A5052	母材	C	200	5	10^{21}	1	
C9	A5052	母材	C	200	5	$.5 \times 10^{21}$	1	
C10	A5052	母材	C	200	5	$.5 \times 10^{21}$	1	
C11	A5052	母材	C	200	5	$.5 \times 10^{21}$	1	
C12	A5052	母材	C	200	5	$.5 \times 10^{21}$	1	
(非照射材試験 92.3実施)								
C13	A5052	母材	C	RT	—	—	—	
C14	A5052	母材	C	RT	—	—	—	
C15	A5052	母材	C	100	—	—	—	
C16	A5052	母材	C	100	—	—	—	
C17	A5052	母材	C	150	—	—	—	
C18	A5052	母材	C	150	—	—	—	
C19	A5052	母材	C	200	—	—	—	
C20	A5052	母材	C	200	—	—	—	
(94.3- 94.4, 1サイクル照射)								
5C1	A5052	母材	C	RT	1	2×10^{20}	3	
5C2	A5052	母材	C	RT	1	2×10^{20}	3	
5C3	A5052	母材	C	150	1	10^{20}	3	
5C4	A5052	母材	C	150	1	10^{20}	3	
(93.3- 94.1, 5サイクル照射)								
5CW1	A5052	溶接	C	RT	5	10^{21}	2	
5CW2	A5052	溶接	C	RT	5	10^{21}	2	
5CW3	A5052	溶接	C	RT	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
5CW4	A5052	溶接	C	RT	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
(94.3- 94.4, 1サイクル照射)								
5CW5	A5052	溶接	C	RT	1	2×10^{20}	3	
5CW6	A5052	溶接	C	RT	1	2×10^{20}	3	
5CW7	A5052	溶接	C	RT	1	10^{20}	3	
5CW8	A5052	溶接	C	RT	1	10^{20}	3	

Table 4.2 (2/2) シャルピー衝撃試験マトリックス

(非照射材試験 93.3実施)								
5CW9	A5052	溶接	C	RT	—	—	—	
5CW10	A5052	溶接	C	RT	—	—	—	
(93.3- 94.1, 5サイクル照射)								
6C1	A6061	母材	C	RT	5	10^{21}	2	
6C2	A6061	母材	C	RT	5	10^{21}	2	
6C3	A6061	母材	C	150	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
6C4	A6061	母材	C	150	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
(非照射材試験 93.3実施)								
6C5	A6061	母材	C	RT	—	—	—	
6C6	A6061	母材	C	RT	—	—	—	
(非照射材試験 94.3実施)								
6CW5	A6061	溶接	C	RT	—	—	—	
6CW6	A6061	溶接	C	RT	—	—	—	

Table 4.3 (1/4) 破壊靱性試験マトリックス

No.	材料	母/溶接	試験片	試験温度	照射サイクル	照射量	キャセル	備考	
CT1	A5052	母材	DCT	—	—	—	—	予備	
CT2	A5052	母材	DCT	—	—	—	—	予備	
CT3	A5052	母材	DCT	—	—	—	—	予備	
CT4	A5052	母材	DCT	—	—	—	—	予備	
CT5	A5052	母材	DCT	—	—	—	—	予備	
CT6	A5052	母材	DCT	—	—	—	—	予備	
(92.1- 92.7, 5 サイクル照射)									
CT7	A5052	母材	DCT	RT	5	10^{21}	1	予備 予備	
CT8	A5052	母材	DCT	RT	5	10^{21}	1		
CT9	A5052	母材	DCT	RT	5	10^{21}	1		
CT10	A5052	母材	DCT	100	5	10^{21}	1		
CT11	A5052	母材	DCT	100	5	10^{21}	1		
CT12	A5052	母材	DCT	100	5	10^{21}	1		
CT13	A5052	母材	DCT	150	5	10^{21}	1		
CT14	A5052	母材	DCT	150	5	10^{21}	1		
CT15	A5052	母材	DCT	150	5	10^{21}	1		
CT16	A5052	母材	DCT	200	5	10^{21}	1		
CT17	A5052	母材	DCT	200	5	10^{21}	1		
CT18	A5052	母材	DCT	200	5	10^{21}	1		
CT19	A5052	母材	DCT	—	5	10^{21}	1		
CT20	A5052	母材	DCT	—	5	10^{21}	1		
CT21	A5052	母材	DCT	RT	5	$.5 \times 10^{21}$	1		
CT22	A5052	母材	DCT	RT	5	$.5 \times 10^{21}$	1		
CT23	A5052	母材	DCT	150	5	$.5 \times 10^{21}$	1		
CT24	A5052	母材	DCT	150	5	$.5 \times 10^{21}$	1		
(非照射材試験, 92.3実施)									
CT25	A5052	母材	DCT	RT	—	—	—		
CT26	A5052	母材	DCT	RT	—	—	—		
CT27	A5052	母材	DCT	RT	—	—	—		
CT28	A5052	母材	DCT	100	—	—	—		
CT29	A5052	母材	DCT	100	—	—	—		
CT30	A5052	母材	DCT	100	—	—	—		
CT31	A5052	母材	DCT	150	—	—	—		
CT32	A5052	母材	DCT	150	—	—	—		
CT33	A5052	母材	DCT	150	—	—	—		
CT34	A5052	母材	DCT	200	—	—	—		
CT35	A5052	母材	DCT	200	—	—	—		
CT36	A5052	母材	DCT	200	—	—	—		

Table 4.3 (2/4) 破壊靱性試験マトリックス

(94.3- 94.4, 1 サイクル照射)								
5D1	A5052	母材	DCT	RT	1	2×10^{20}	3	予備
5D2	A5052	母材	DCT	RT	1	2×10^{20}	3	
5D3	A5052	母材	DCT	RT	1	2×10^{20}	3	
5D4	A5052	母材	DCT	RT	1	2×10^{20}	3	
5D5	A5052	母材	DCT	150	1	2×10^{20}	3	
5D6	A5052	母材	DCT	150	1	2×10^{20}	3	
5D7	A5052	母材	DCT	150	1	2×10^{20}	3	
5D8	A5052	母材	DCT	150	1	2×10^{20}	3	
5D9	A5052	母材	DCT	RT	1	10^{20}	3	
5D10	A5052	母材	DCT	RT	1	10^{20}	3	
5D11	A5052	母材	DCT	150	1	10^{20}	3	
5D12	A5052	母材	DCT	150	1	10^{20}	3	
(93.3- 94.1, 5 サイクル照射)								
5DW1	A5052	溶接	DCT	RT	5	10^{21}	2	予備
5DW2	A5052	溶接	DCT	RT	5	10^{21}	2	
5DW3	A5052	溶接	DCT	RT	5	10^{21}	2	
5DW4	A5052	溶接	DCT	RT	5	10^{21}	2	
5DW5	A5052	溶接	DCT	150	5	10^{21}	2	
5DW6	A5052	溶接	DCT	150	5	10^{21}	2	
5DW7	A5052	溶接	DCT	150	5	10^{21}	2	
5DW8	A5052	溶接	DCT	150	5	10^{21}	2	
5DW9	A5052	溶接	DCT	RT	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
5DW10	A5052	溶接	DCT	RT	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
5DW11	A5052	溶接	DCT	150	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
5DW12	A5052	溶接	DCT	150	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
(94.3- 94.4, 1 サイクル照射)								
5DW13	A5052	溶接	DCT	RT	1	2×10^{20}	3	予備
5DW14	A5052	溶接	DCT	RT	1	2×10^{20}	3	
5DW15	A5052	溶接	DCT	RT	1	2×10^{20}	3	
5DW16	A5052	溶接	DCT	RT	1	2×10^{20}	3	
5DW17	A5052	溶接	DCT	150	1	2×10^{20}	3	
5DW18	A5052	溶接	DCT	150	1	2×10^{20}	3	
5DW19	A5052	溶接	DCT	150	1	2×10^{20}	3	
5DW20	A5052	溶接	DCT	150	1	2×10^{20}	3	
5DW21	A5052	溶接	DCT	RT	1	10^{20}	3	
5DW22	A5052	溶接	DCT	RT	1	10^{20}	3	
5DW23	A5052	溶接	DCT	150	1	10^{20}	3	
5DW24	A5052	溶接	DCT	150	1	10^{20}	3	

Table 4.3 (3/4) 破壊靱性試験マトリックス

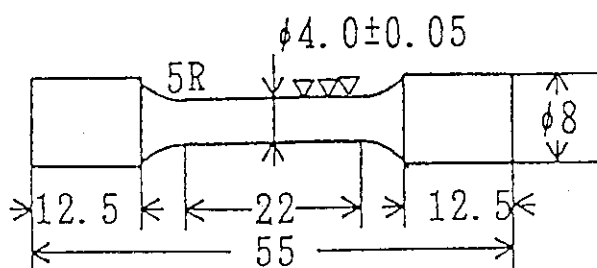
(非照射材試験, 93.3実施)								
5DW25	A5052	溶接	DCT	RT	—	—	—	
5DW26	A5052	溶接	DCT	RT	—	—	—	
5DW27	A5052	溶接	DCT	RT	—	—	—	
5DW28	A5052	溶接	DCT	100	—	—	—	
5DW29	A5052	溶接	DCT	100	—	—	—	
5DW30	A5052	溶接	DCT	100	—	—	—	
5DW31	A5052	溶接	DCT	150	—	—	—	
5DW32	A5052	溶接	DCT	150	—	—	—	
5DW33	A5052	溶接	DCT	150	—	—	—	
5DW34	A5052	溶接	DCT	200	—	—	—	
5DW35	A5052	溶接	DCT	200	—	—	—	
5DW36	A5052	溶接	DCT	200	—	—	—	
(93.3- 94.1, 5サイクル照射)								
6D1	A6061	母材	DCT	RT	5	10^{21}	2	予備
6D2	A6061	母材	DCT	RT	5	10^{21}	2	
6D3	A6061	母材	DCT	RT	5	10^{21}	2	
6D4	A6061	母材	DCT	RT	5	10^{21}	2	
6D5	A6061	母材	DCT	150	5	10^{21}	2	
6D6	A6061	母材	DCT	150	5	10^{21}	2	
6D7	A6061	母材	DCT	150	5	10^{21}	2	
6D8	A6061	母材	DCT	150	5	10^{21}	2	
6D9	A6061	母材	DCT	RT	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
6D10	A6061	母材	DCT	RT	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
6D11	A6061	母材	DCT	150	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
6D12	A6061	母材	DCT	150	5	$.5 \times 10^{21}$	2	
(非照射材試験, 93.3実施)								
6D13	A6061	母材	DCT	RT	—	—	—	
6D14	A6061	母材	DCT	RT	—	—	—	
6D15	A6061	母材	DCT	RT	—	—	—	
6D16	A6061	母材	DCT	100	—	—	—	
6D17	A6061	母材	DCT	100	—	—	—	
6D18	A6061	母材	DCT	100	—	—	—	
6D19	A6061	母材	DCT	150	—	—	—	
6D20	A6061	母材	DCT	150	—	—	—	
6D21	A6061	母材	DCT	150	—	—	—	
6D22	A6061	母材	DCT	200	—	—	—	
6D23	A6061	母材	DCT	200	—	—	—	
6D24	A6061	母材	DCT	200	—	—	—	

Table 4.3 (4/4) 破壊靱性試験マトリックス

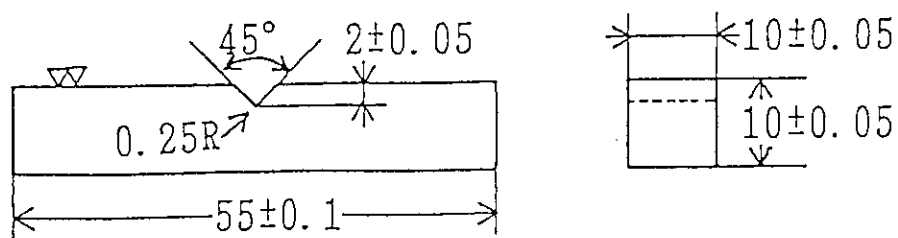
(非照射材試験, 94.3実施)								
6DW13	A6061	溶接	DCT	RT	—	—	—	
6DW14	A6061	溶接	DCT	RT	—	—	—	
6DW15	A6061	溶接	DCT	RT	—	—	—	
6DW16	A6061	溶接	DCT	100	—	—	—	
6DW17	A6061	溶接	DCT	100	—	—	—	
6DW18	A6061	溶接	DCT	100	—	—	—	
6DW19	A6061	溶接	DCT	150	—	—	—	
6DW20	A6061	溶接	DCT	150	—	—	—	
6DW21	A6061	溶接	DCT	150	—	—	—	
6DW22	A6061	溶接	DCT	200	—	—	—	
6DW23	A6061	溶接	DCT	200	—	—	—	
6DW24	A6061	溶接	DCT	200	—	—	—	

Table 5.1 硬さ試験結果

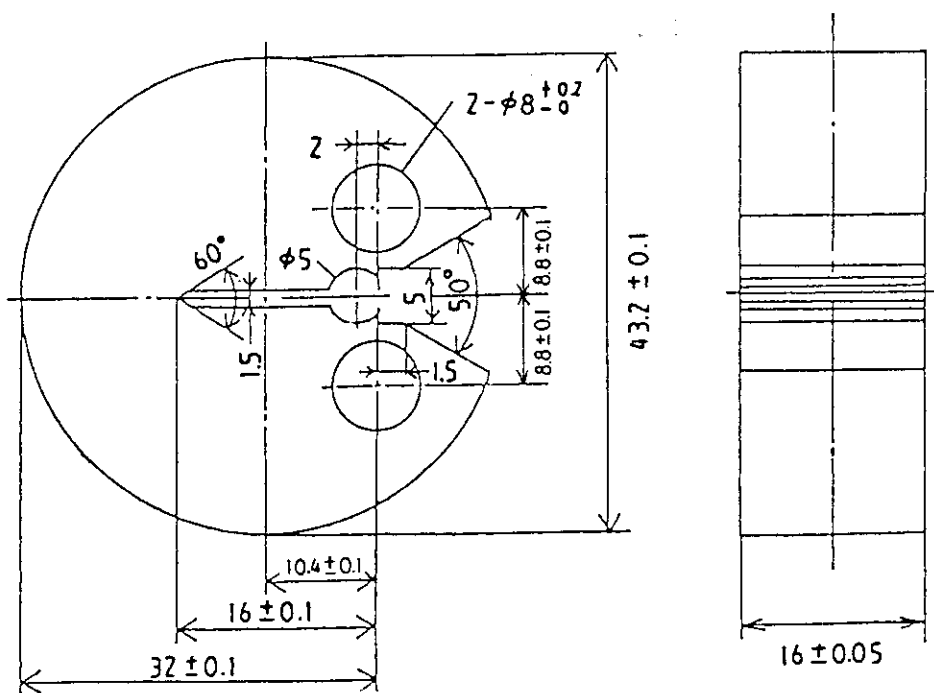
A5052母材試験片 :	58.96	58.13	59.44	62.50	61.49	63.75	61.59	58.59	平均値
									60.56
A6061母材試験片 :	111.0	107.9	119.2	119.7	117.6	111.2	112.0	107.2	平均値
									113.2



引張り試験片



シャルピー衝撃試験片



破壊靱性試験片

Fig. 3.1 試験片形状, 寸法

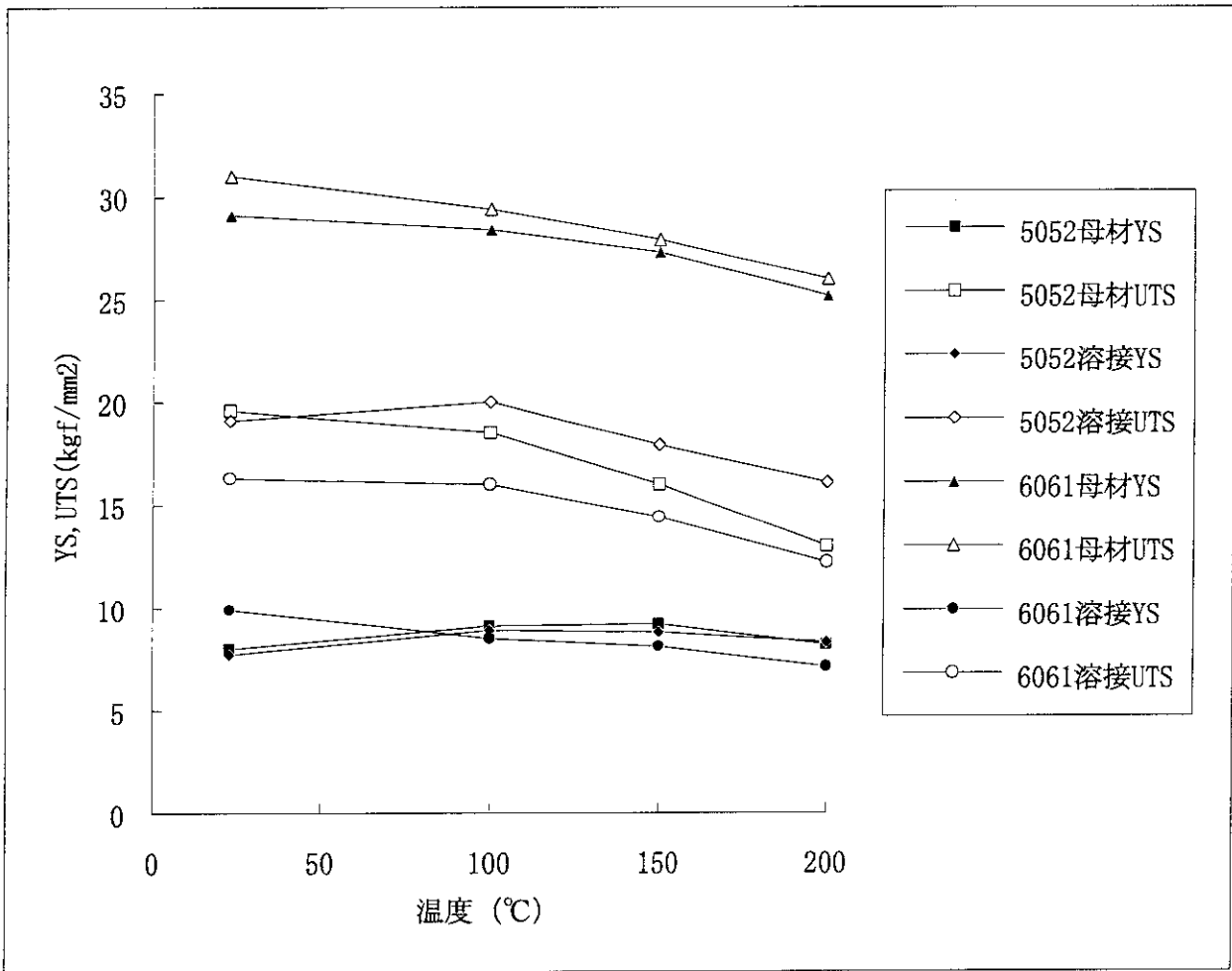


Fig. 5.1 引張り試験結果 (耐力, 引張り強さ)

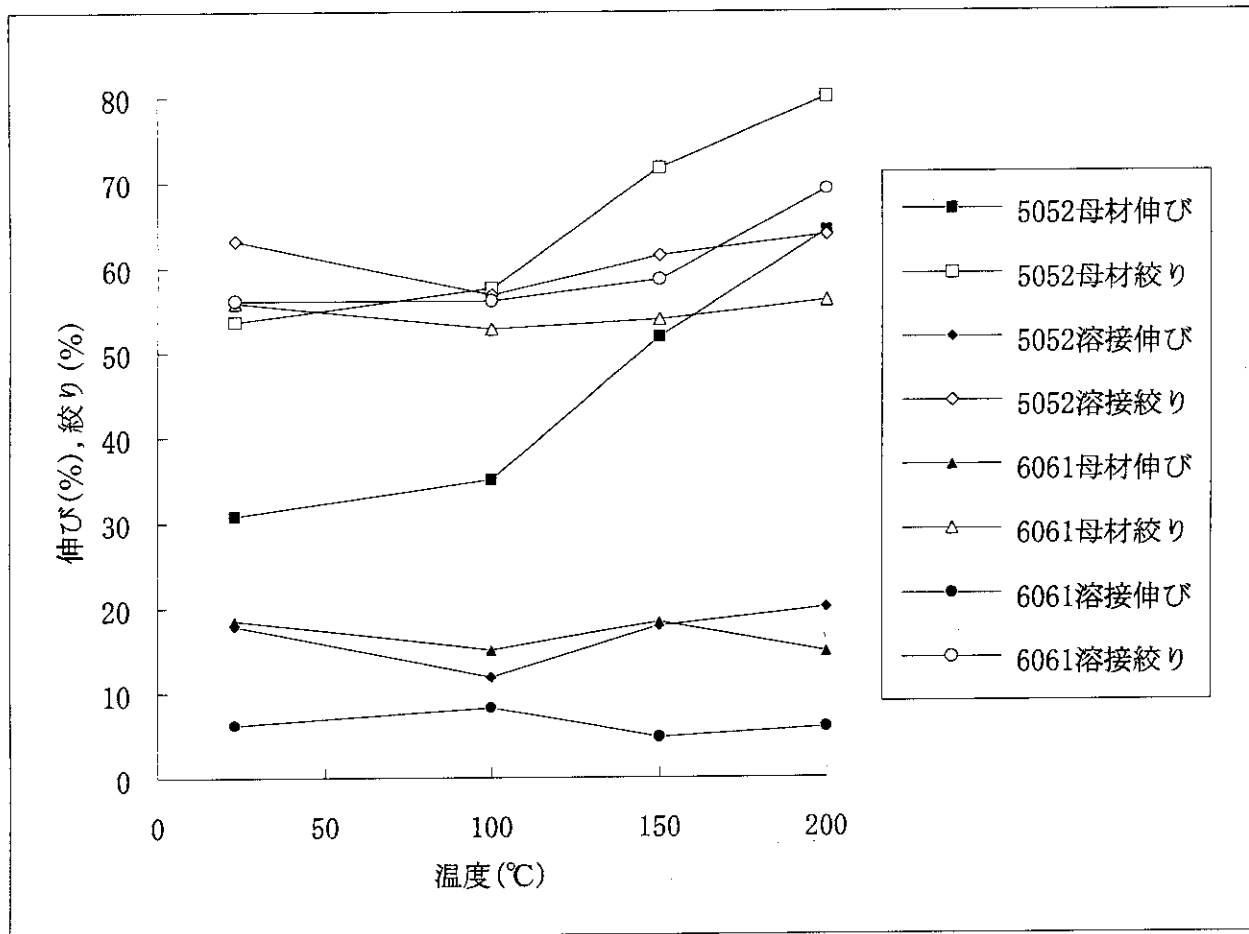


Fig. 5.2 引張り試験結果 (伸び, 絞り)

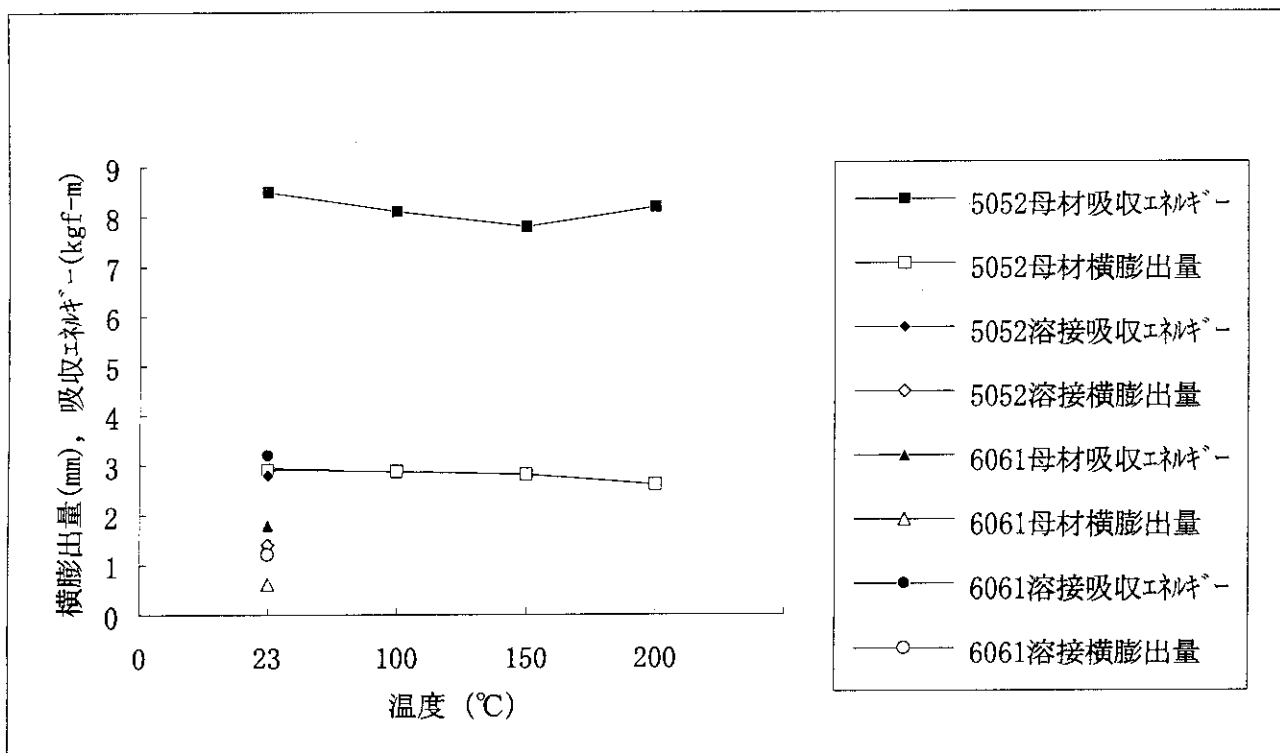


Fig. 5.3 シャルピー衝撃試験結果

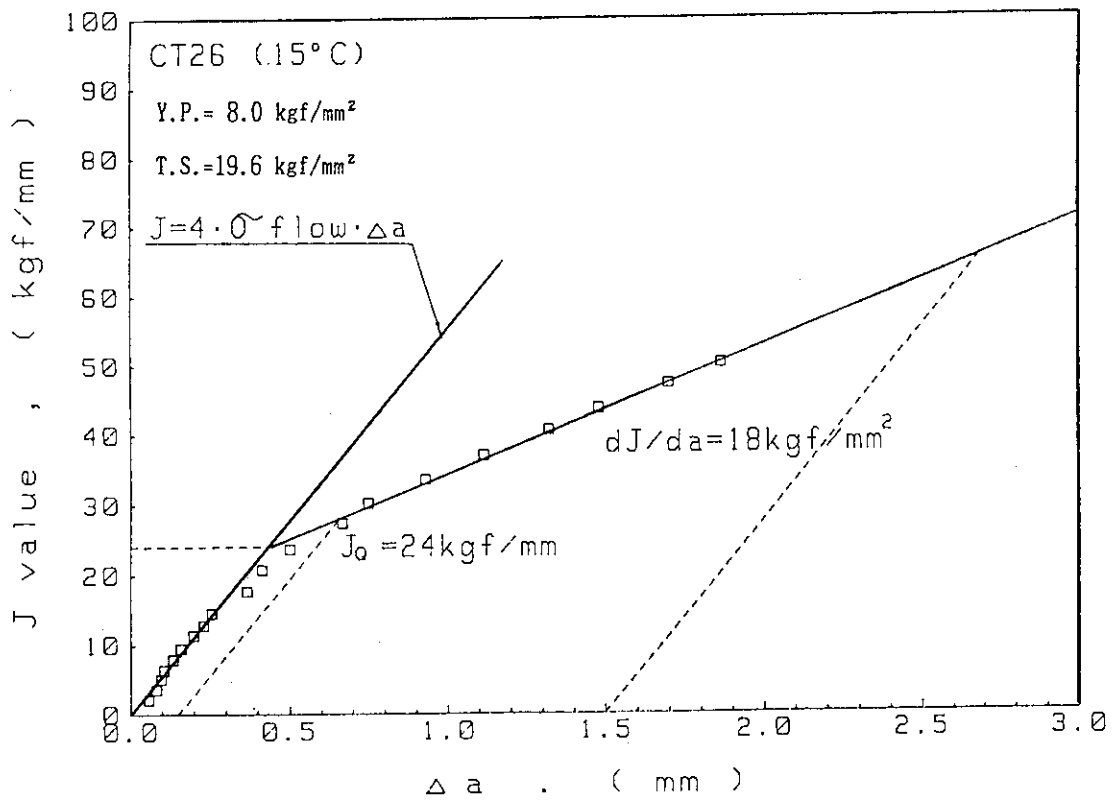
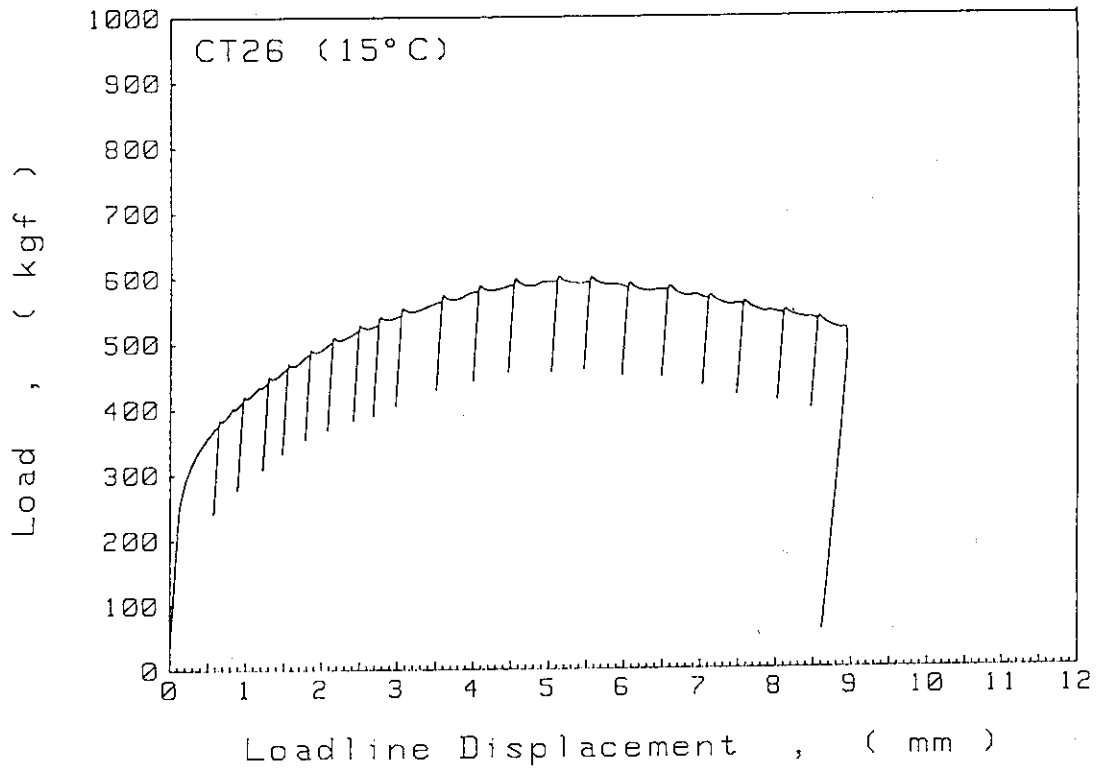


Fig. 5.4 A5052 合金母材破壊靱性試験片 (サイドグループなし) の荷重-変位曲線及び亀裂進展抵抗曲線

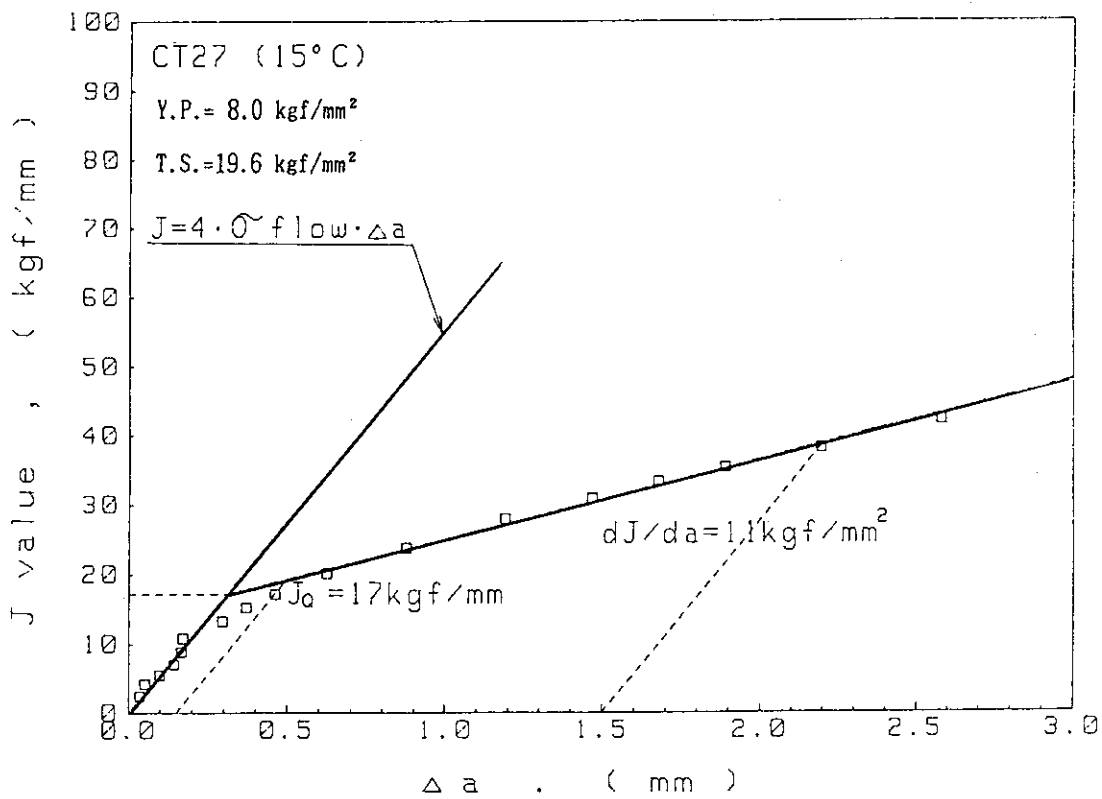
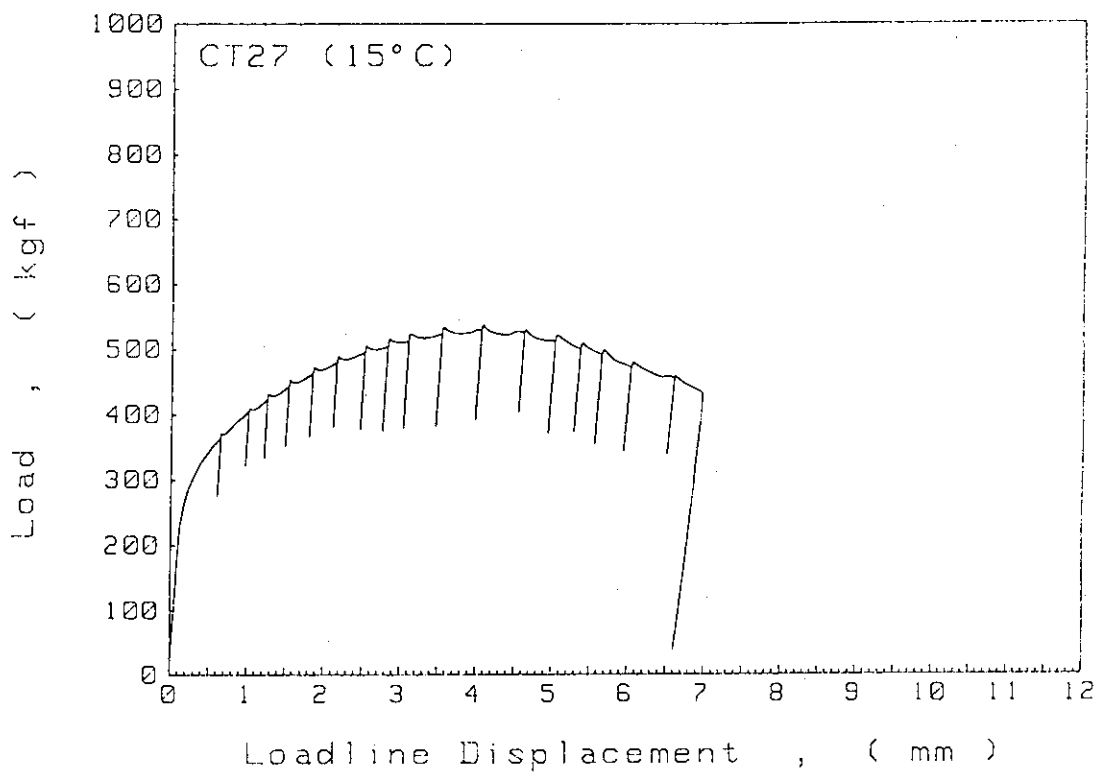


Fig. 5.5 A5052 合金母材破壊靱性試験片の荷重—変位曲線
及び亀裂進展抵抗曲線

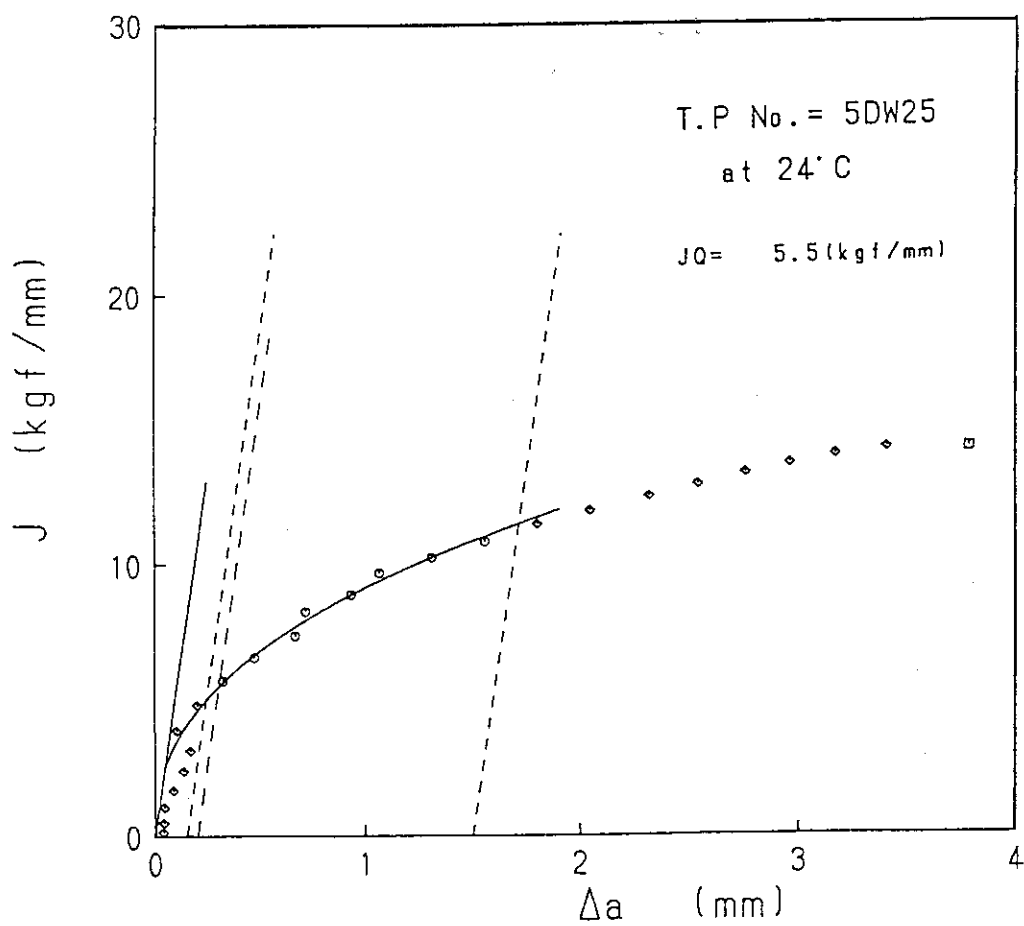
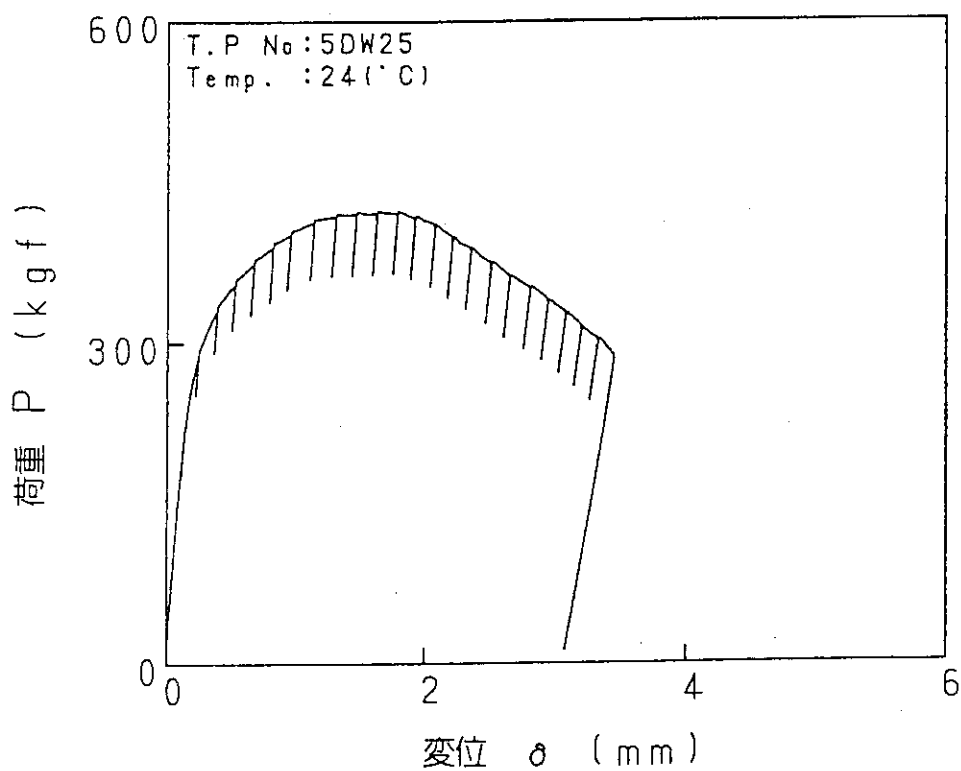


Fig. 5.6 A5052 合金溶接継手破壊靱性試験片の荷重-変位曲線
及び亀裂進展抵抗曲線

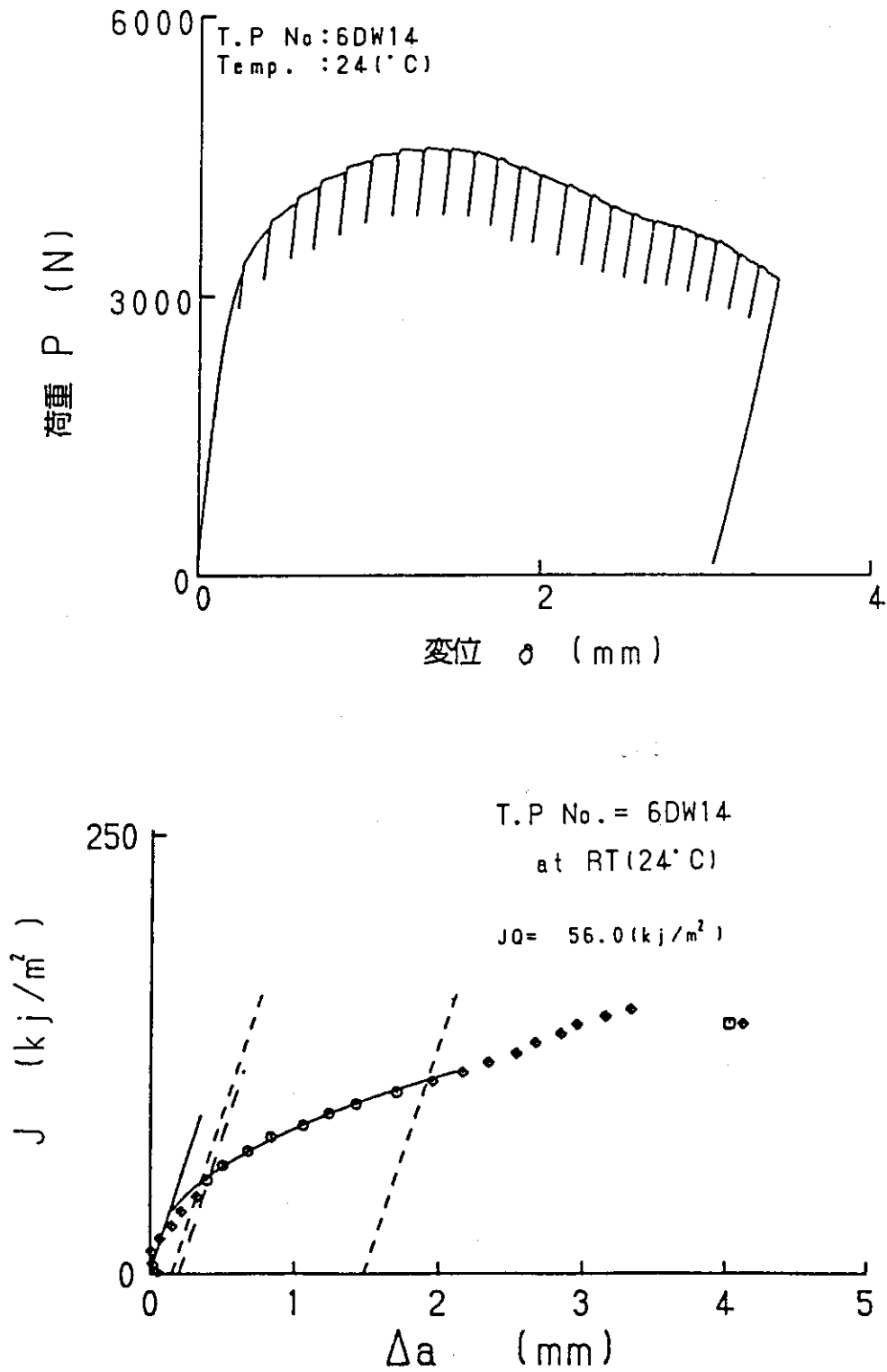


Fig. 5.7 A6061 合金溶接継手破壊靱性試験片の荷重-変位曲線及び亀裂進展抵抗曲線

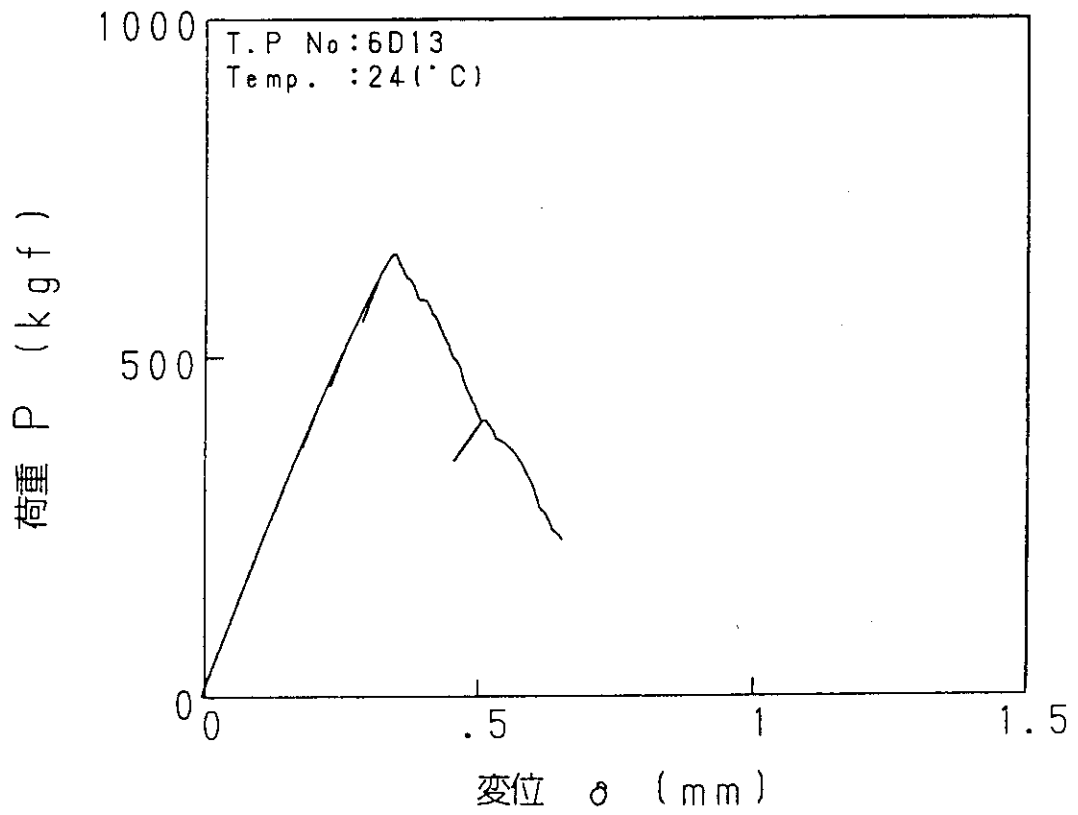


Fig. 5.8 A6061 合金母材破壊靱性試験片の荷重-変位曲線

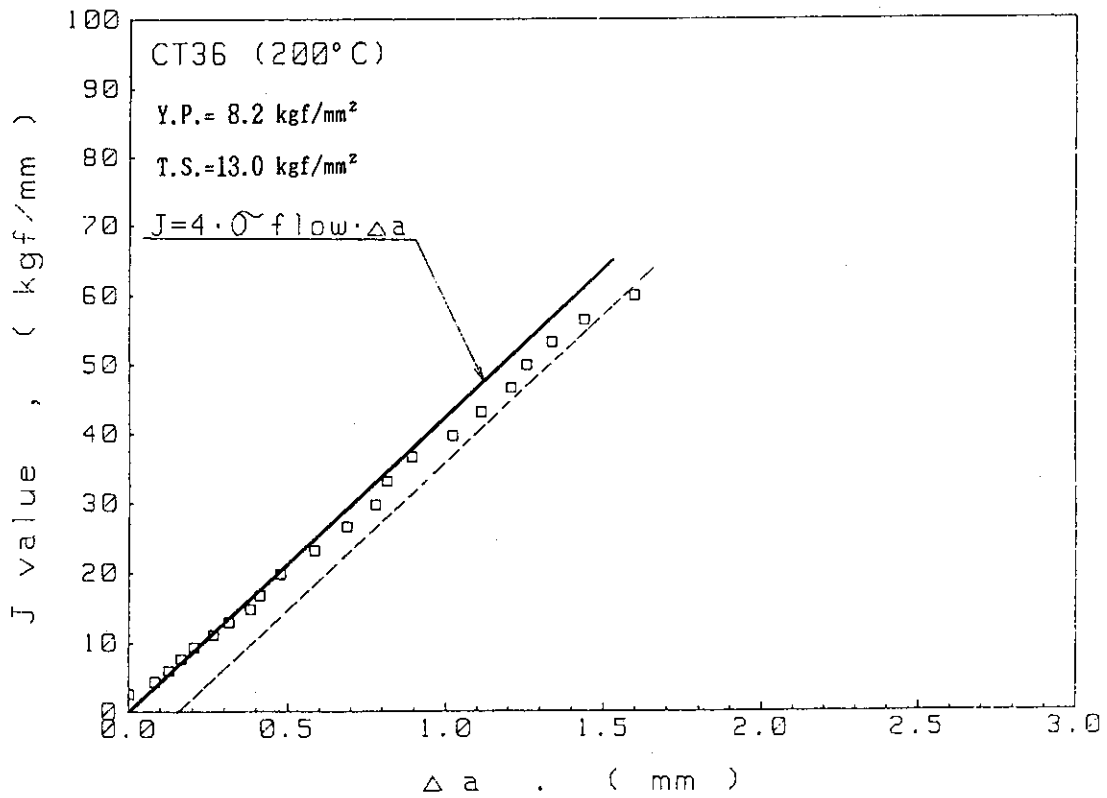
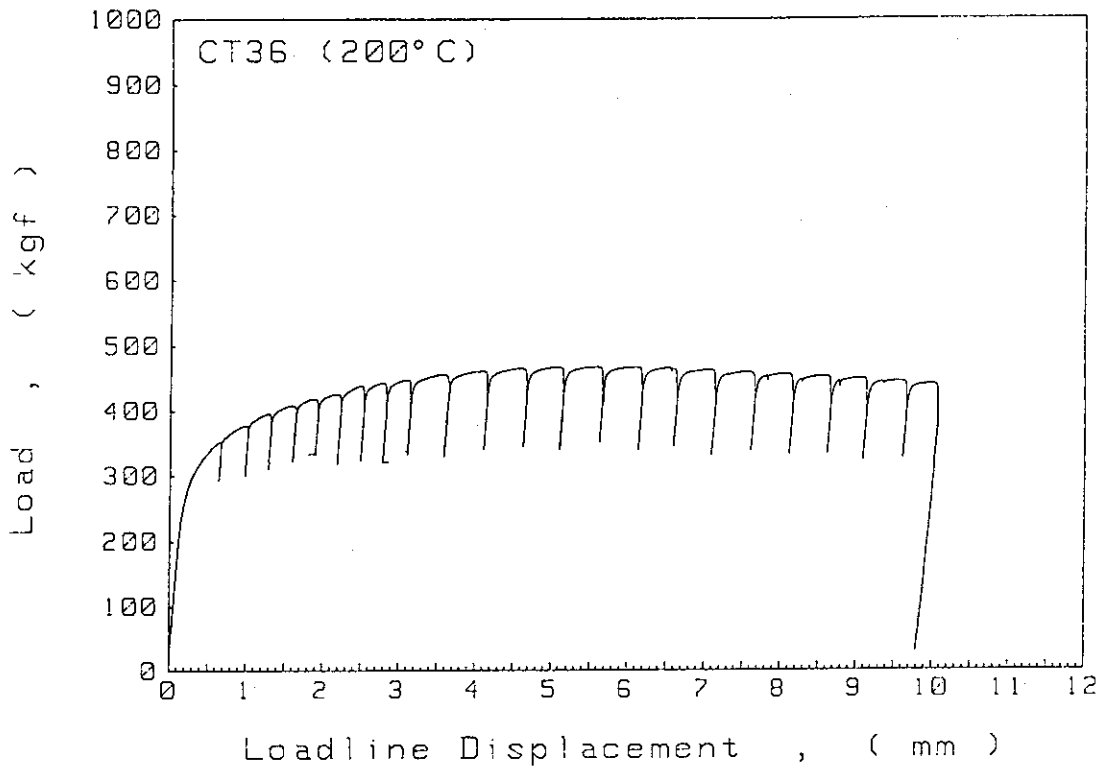


Fig. 5.9 A5052 合金母材破壊靱性試験片の荷重-変位曲線
及び亀裂進展抵抗曲線

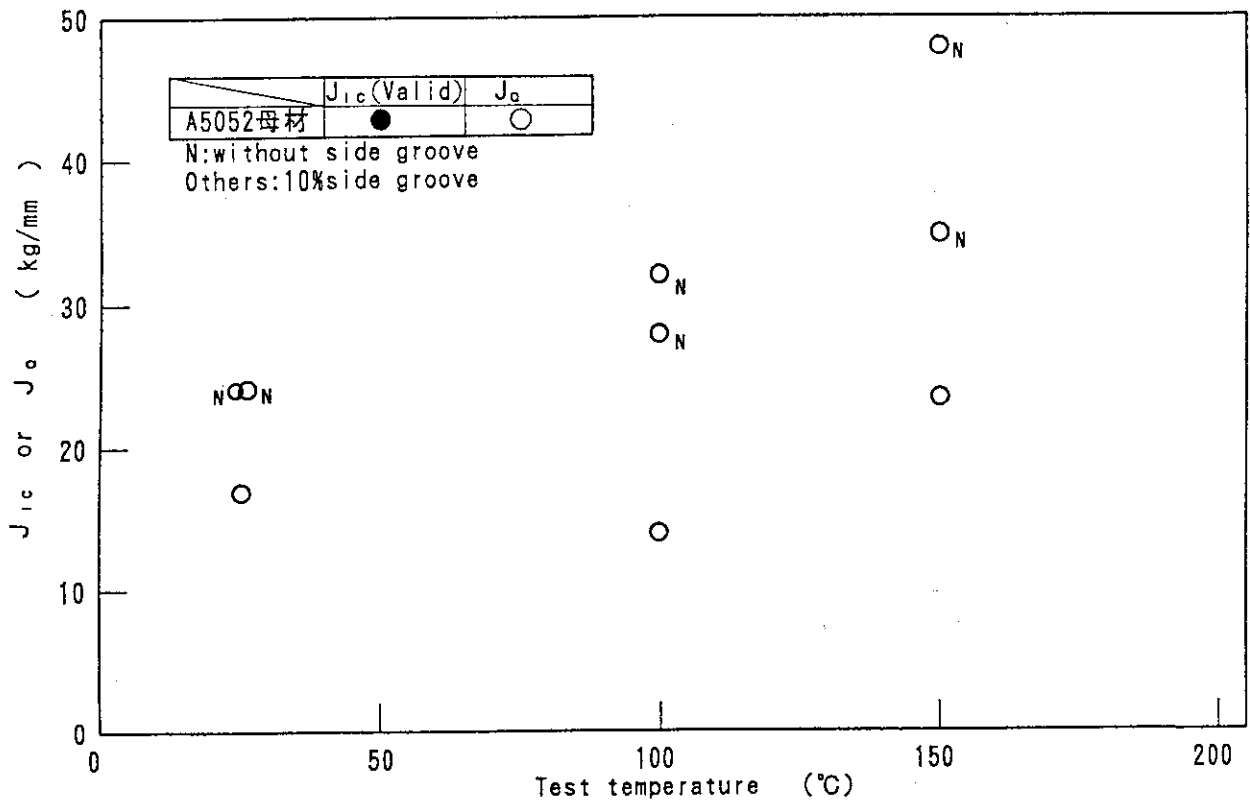


Fig. 5.10 A5052 合金の破壊靱性試験におけるサイドグループの影響

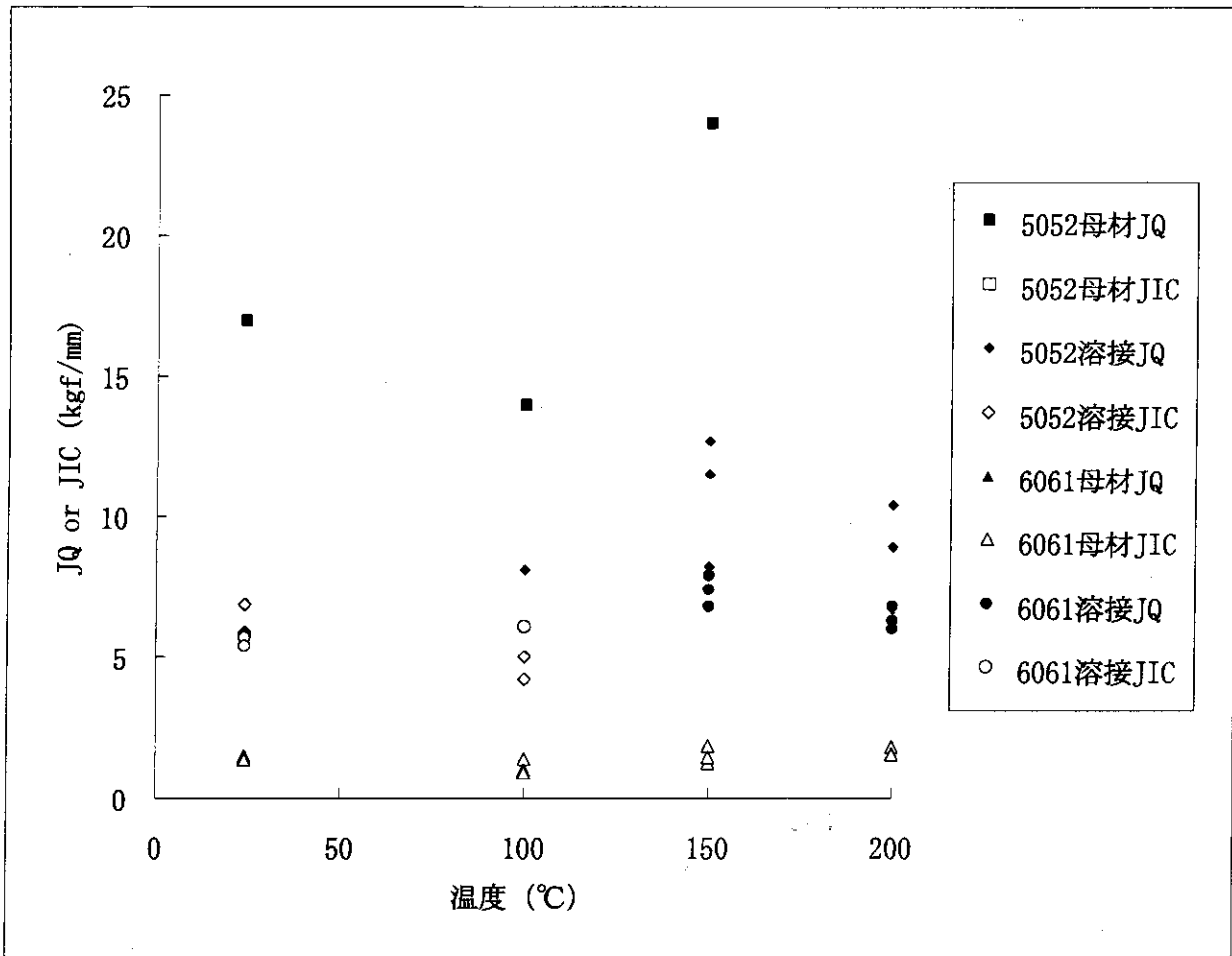


Fig. 5.11 アルミニウム合金の破壊靱性の比較
 (A6061母材の J_Q 値は、 $J_Q=(1-\nu^2)K_Q^2/E$ により求めた)

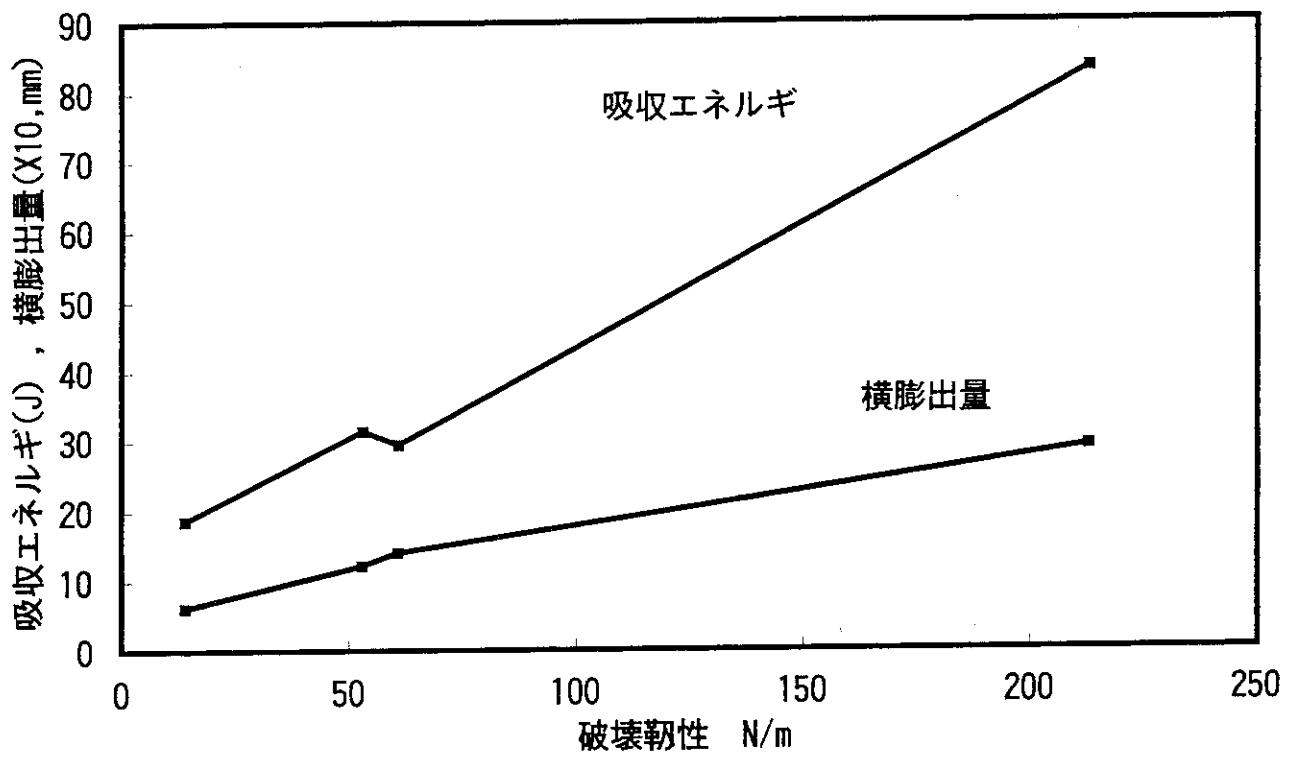
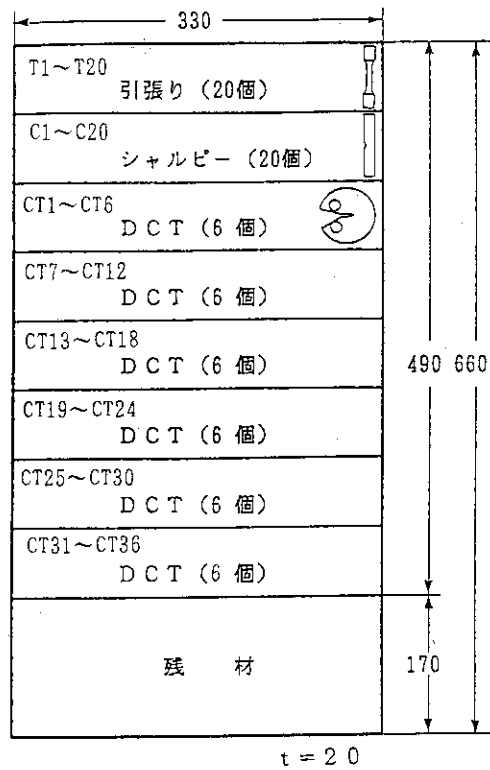


Fig. 5.12 シャルピー吸収エネルギーおよび横膨出量と破壊靱性値との相関

付 録

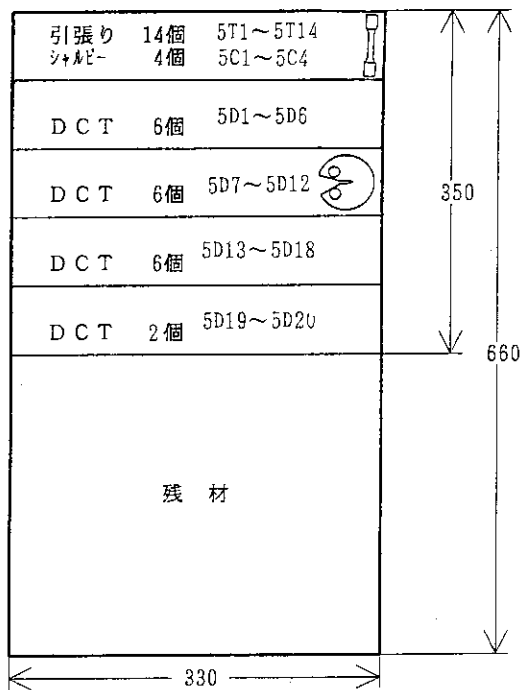
本付録には下記のデータを資料集として収録した。

- A 1. 試験片採取図 : Fig. A1(1/7~7/7)
- A 2. 引張り試験結果 : Table A1
- A 3. シャルピー衝撃試験結果 : Table A2
- A 4. 破壊靱性試験片への予亀裂導入条件 : Table A3
- A 5. 破壊靱性試験結果 : Table A4, Table A5, Table A6, Table A7
- A 6. 走査電子顕微鏡による破面観察結果 : Fig. A2~Fig. A5



A5052母材試験片の採取方法

Fig. A1(1/7) 試験片採取方法



A5052母材試験片 (H4年度分) の採取方法

Fig. A1(2/7) 試験片採取方法

溶接板 1	引張り 20個 5TW1 ~ 5TW20
溶接板 2	引張り 10個 5TW21 ~ 5TW30 シールド 10個 5CW1 ~ 5CW10
溶接板 3	D C T 6個 5DW1 ~ 5DW6
溶接板 4	D C T 6個 5DW7 ~ 5DW12
溶接板 5	D C T 6個 5DW13 ~ 5DW18
溶接板 6	D C T 6個 5DW19 ~ 5DW24
溶接板 7	D C T 6個 5DW25 ~ 5DW30

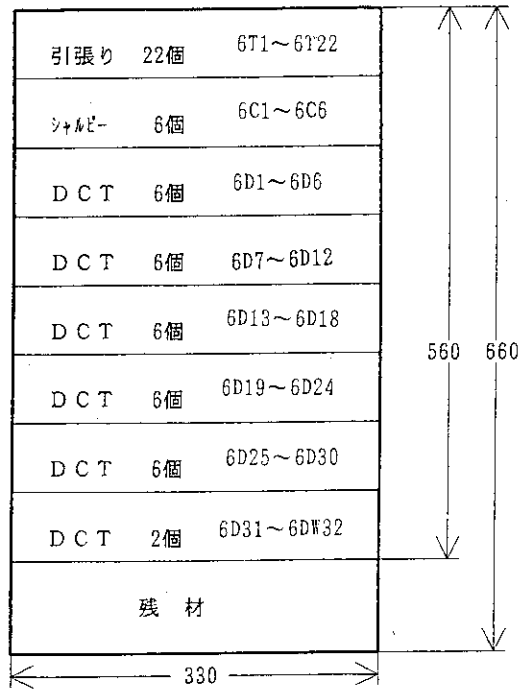
A5052溶接試験片の採取方法(1)

Fig. A1(3/7) 試験片採取方法

溶接板 8	D C T 6個 5DW31 ~ 5DW36
溶接板 9	D C T 6個 5DW37 ~ 5DW42
溶接板 10	D C T 2個 5DW43 ~ 5DW44
溶接板 11	残 材

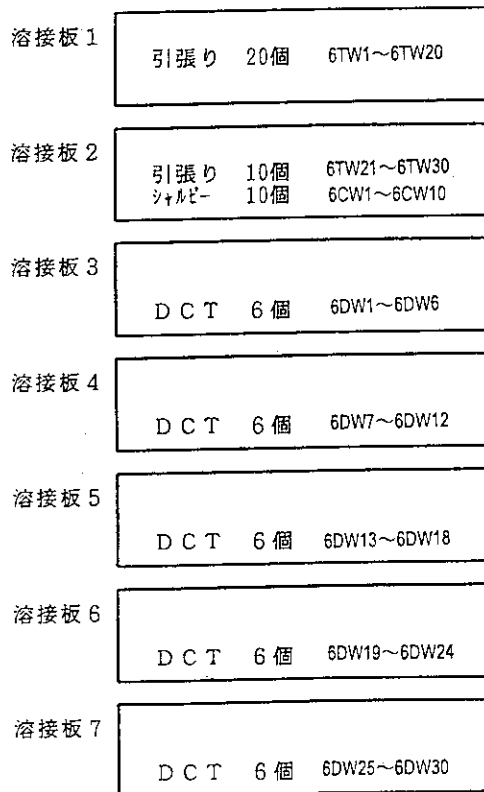
A5052溶接試験片の採取方法(2)

Fig. A1(4/7) 試験片採取方法



A6061母材試験片の採取方法

Fig. A1(5/7) 試験片採取方法



A6061溶接試験片の採取方法 (1)

Fig. A1(6/7) 試験片採取方法

溶接板 8	D C T 6 個 6DW31~6DW36
溶接板 9	D C T 6 個 6DW37~6DW42
溶接板 10	D C T 2 個 6DW43~6DW44
溶接板 11	残 材

A6061溶接試験片の採取方法 (2)

Fig. A1(7/7) 試験片採取方法

Table A.1 引張試験結果

A 5 0 5 2 母材試験片				
温度	耐力(kgf/mm ²)	引張り強さ(kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
R. T	8.1	19.8	30.5	53.6
(22°C)	7.9	19.4	31.0	53.6
平均値	8.0	19.6	30.8	53.6
100°C	8.2	18.1	36.5	60.2
	9.9	18.9	33.5	54.9
平均値	9.1	18.5	35.0	57.6
150°C	10.1	16.1	48.0	70.4
	8.2	15.9	55.5	72.9
平均値	9.2	16.0	51.8	71.7
200°C	8.2	12.9	68.0	80.5
	8.2	13.1	60.5	79.4
平均値	8.2	13.0	64.3	80.0
A 5 0 5 2 溶接試験片				
温度	耐力(kgf/mm ²)	引張り強さ(kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
R. T	8.4	19.3	20.5	63.1
(24°C)	7.0	18.9	15.0	63.1
平均値	7.7	19.1	17.8	63.1
100°C	9.1	20.2	6.5	56.9
	8.7	19.7	17.0	56.7
平均値	8.9	20.0	11.8	56.8
150°C	8.8	17.8	18.5	61.1
	8.8	17.9	17.0	61.7
平均値	8.8	17.9	17.8	61.4
200°C	8.0	16.1	20.0	63.9
	8.6	16.0	20.0	63.6
平均値	8.3	16.1	20.0	63.8
A 6 0 6 1 母材試験片				
温度	耐力(kgf/mm ²)	引張り強さ(kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
R. T	29.0	31.0	18.0	57.2
(24°C)	29.2	31.0	19.0	54.6
平均値	29.1	31.0	18.5	55.9
100°C	28.4	29.4	15.5	51.4
	28.3	29.4	14.5	54.2
平均値	28.4	29.4	15.0	52.8
150°C	27.3	27.8	20.0	55.1
	27.3	28.0	16.5	52.7
平均値	27.3	27.9	18.3	53.9
200°C	25.1	26.0	16.0	58.6
	25.2	25.9	13.5	53.5
平均値	25.2	26.0	14.8	56.1

A 6 0 6 1 溶接試験片				
温度	耐力 (kgf/mm ²)	引張り強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	伸び (%)
R. T	9.5	16.6	7.1	59.4
(23°C)	10.2	15.9	5.0	52.7
平均値	9.9	16.3	6.1	56.1
100°C	8.4	16.3	7.1	54.4
	8.6	15.7	9.3	57.8
平均値	8.5	16.0	8.2	56.1
150°C	8.3	14.6	3.6	59.4
	7.8	14.2	5.7	57.8
平均値	8.1	14.4	4.7	58.6
200°C	7.1	13.0	7.9	69.8
	7.1	11.5	3.6	68.4
平均値	7.1	12.2	5.8	69.1

Table A2 シャルピー衝撃試験結果

	吸収エネルギー (kgf-m)	衝撃値 (kgf-m/cm ²)	延性破面率 (%)	横膨出量 (mm)
A5052母材試験片	8.5	10.6	100	2.86
R. T(22°C)	8.5	10.6	100	2.93
平均値	8.5	10.6	100	2.90
100°C	8.2	10.2	100	2.83
	7.9	9.9	100	2.93
平均値	8.1	10.1	100	2.88
150°C	7.9	9.9	100	2.82
	7.6	9.5	100	2.81
平均値	7.8	9.7	100	2.82
200°C	8.2	10.2	100	2.44
	8.2	10.2	100	2.79
平均値	8.2	10.2	100	2.62
A5052溶接試験片	3.0	3.8	100	1.55
R. T(23°C)	2.5	3.1	100	1.24
平均値	2.8	3.5	100	1.40
A6061母材試験片	1.9	2.4	100	0.63
R. T(23°C)	1.7	2.1	100	0.59
平均値	1.8	2.3	100	0.61
A6061溶接試験片	3.2	4.0	100	1.19
R. T(23°C)	3.2	4.0	100	1.23
平均値	3.2	4.0	100	1.21

Table A3 (1/4) 破壊靱性試験片の予亀裂導入条件と予亀裂長さ

No.	材 料	母材/ 溶接	試験 温度	最終荷重 (kgf)	最終 ΔK (kgf/mm ^{1.5})	a ₁ (mm)	a ₂ (mm)	備 考
CT1	A5052	母材	—	75-275	28.3	1.50	1.87	予備
CT2	A5052	母材	—	20-220	28.3	2.69	1.70	予備
CT3	A5052	母材	—	20-220	26.1	2.50	1.66	予備
CT4	A5052	母材	—	20-200	26.7	3.0	3.0	
CT5	A5052	母材	—	20-200	26.3	2.68	1.89	予備
CT6	A5052	母材	—	—	—	—	—	over load
CT7	A5052	母材	RT	20-200	25.3	1.67	1.48	5サイクル照射
CT8	A5052	母材	RT	20-200	25.8	1.69	1.67	
CT9	A5052	母材	RT	20-200	25.8	1.60	1.76	
CT10	A5052	母材	100	20-200	25.8	1.73	1.75	
CT11	A5052	母材	100	20-200	25.8	1.69	1.75	
CT12	A5052	母材	100	20-220	25.8	1.50	1.95	
CT13	A5052	母材	150	20-220	25.8	1.55	1.91	
CT14	A5052	母材	150	20-220	25.8	1.68	1.81	
CT15	A5052	母材	150	20-220	28.7	1.70	1.64	
CT16	A5052	母材	200	20-220	28.7	1.86	1.59	
CT17	A5052	母材	200	20-220	28.8	1.82	1.75	
CT18	A5052	母材	200	20-220	28.7	1.72	1.70	
CT19	A5052	母材	—	20-220	28.7	1.73	1.74	(予備)
CT20	A5052	母材	—	20-220	28.7	1.69	1.68	(予備)
CT21	A5052	母材	RT	20-220	28.8	1.82	1.80	
CT22	A5052	母材	RT	20-220	28.7	1.83	1.56	
CT23	A5052	母材	150	20-220	28.8	1.83	1.77	
CT24	A5052	母材	150	20-220	28.6	1.67	1.63	
CT25	A5052	母材	RT	(予亀裂導入条件不明)				非照射材試験
CT26	A5052	母材	RT					
CT27	A5052	母材	RT					
CT28	A5052	母材	100					
CT29	A5052	母材	100					
CT30	A5052	母材	100					
CT31	A5052	母材	150					
CT32	A5052	母材	150					
CT33	A5052	母材	150					
CT34	A5052	母材	200					
CT35	A5052	母材	200					
CT36	A5052	母材	200					

Table A3 (2/4) 破壊靱性試験片の予亀裂導入条件と予亀裂長さ

5D1	A5052	母材	RT	20-230	約 28	1.8	1.5	1サイクル照射
5D2	A5052	母材	RT	20-230		1.9	1.7	
5D3	A5052	母材	RT	20-230		1.9	1.9	
5D4	A5052	母材	RT	20-230		1.9	1.7	(予備)
5D5	A5052	母材	150	20-230		1.8	1.7	
5D6	A5052	母材	150	20-230		1.7	1.7	
5D7	A5052	母材	150	20-230		1.9	1.9	
5D8	A5052	母材	150	20-230		1.7	1.5	(予備)
5D9	A5052	母材	RT	20-230		1.8	1.8	
5D10	A5052	母材	RT	20-230		1.8	1.8	
5D11	A5052	母材	150	20-230		1.9	1.8	
5D12	A5052	母材	150	20-230		1.7	1.7	
5DW1	A5052	溶接	RT	20-230	30.0	1.7	1.5	5サイクル照射
5DW2	A5052	溶接	RT	20-230	30.2	1.8	1.8	
5DW3	A5052	溶接	RT	20-230	30.1	1.7	1.7	
5DW4	A5052	溶接	RT	20-230	30.0	1.7	1.5	(予備)
5DW5	A5052	溶接	150	20-230	30.2	1.9	1.7	
5DW6	A5052	溶接	150	20-230	30.1	1.7	1.6	
5DW7	A5052	溶接	150	20-230	30.2	1.8	1.7	
5DW8	A5052	溶接	150	20-230	30.1	1.6	1.5	(予備)
5DW9	A5052	溶接	RT	20-230	30.2	1.8	1.8	
5DW10	A5052	溶接	RT	20-230	30.0	1.6	1.5	
5DW11	A5052	溶接	150	20-230	30.2	1.8	1.8	
5DW12	A5052	溶接	150	20-230	30.0	1.6	1.5	
5DW13	A5052	溶接	RT	20-230	約 28	1.8	1.8	1サイクル照射
5DW14	A5052	溶接	RT	20-230		1.7	1.6	
5DW15	A5052	溶接	RT	20-230		1.7	1.7	
5DW16	A5052	溶接	RT	20-230		1.8	1.7	(予備)
5DW17	A5052	溶接	150	20-230		1.7	1.5	
5DW18	A5052	溶接	150	20-230		1.8	1.5	
5DW19	A5052	溶接	150	20-230		1.8	1.6	
5DW20	A5052	溶接	150	20-230		1.7	1.6	(予備)
5DW21	A5052	溶接	RT	20-230		1.7	1.6	(予備)
5DW22	A5052	溶接	RT	20-230		1.7	1.6	(予備)
5DW23	A5052	溶接	150	20-230		1.8	1.7	(予備)
5DW24	A5052	溶接	150	20-230		1.8	1.9	(予備)

Table A3 (3/4) 破壊靱性試験片の予亀裂導入条件と予亀裂長さ

5DW25	A5052	溶接	RT	20-230	32.5	2.2	1.8	非照射材試験
5DW26	A5052	溶接	RT	20-230	31.4	1.6	1.7	
5DW27	A5052	溶接	RT	20-230	31.1	1.8	1.6	
5DW28	A5052	溶接	100	20-230	33.1	1.6	2.2	
5DW29	A5052	溶接	100	20-230	31.1	1.9	1.7	
5DW30	A5052	溶接	100	20-230	33.6	1.9	1.8	
5DW31	A5052	溶接	150	20-230	31.2	1.6	1.6	
5DW32	A5052	溶接	150	20-230	29.7	1.7	1.5	
5DW33	A5052	溶接	150	20-230	30.4	1.8	1.7	
5DW34	A5052	溶接	200	20-230	31.1	1.7	1.6	
5DW35	A5052	溶接	200	20-230	30.7	1.6	1.5	
5DW36	A5052	溶接	200	20-230	30.0	1.6	1.5	
6D1	A6061	母材	RT	20-220	26.8	1.6	1.6	
6D2	A6061	母材	RT	20-230	30.1	1.7	1.6	
6D3	A6061	母材	RT	20-230	30.3	1.9	1.8	
6D4	A6061	母材	RT	20-230	30.0	1.6	1.5	
6D5	A6061	母材	150	20-230	30.0	1.5	1.5	
6D6	A6061	母材	150	20-230	30.0	1.6	1.5	
6D7	A6061	母材	150	20-230	30.1	1.7	1.6	
6D8	A6061	母材	150	20-230	30.0	1.6	1.6	
6D9	A6061	母材	RT	20-230	30.1	1.2	2.2	
6D10	A6061	母材	RT	20-230	30.1	1.7	1.6	
6D11	A6061	母材	150	20-230	30.0	1.5	1.5	
6D12	A6061	母材	150	20-230	30.0	1.5	1.5	
6D13	A6061	母材	RT	20-230	36.6	1.6	1.6	非照射材試験
6D14	A6061	母材	RT	20-230	36.7	1.5	1.5	
6D15	A6061	母材	RT	20-230	36.0	1.5	1.5	
6D16	A6061	母材	100	20-230	35.7	1.5	1.5	
6D17	A6061	母材	100	20-230	38.2	1.8	1.9	
6D18	A6061	母材	100	20-230	37.3	1.9	1.6	
6D19	A6061	母材	150	20-230	37.2	1.5	1.5	
6D20	A6061	母材	150	20-230	36.0	1.5	1.8	
6D21	A6061	母材	150	20-230	36.8	1.5	1.5	
6D22	A6061	母材	200	20-230	34.7	1.5	1.6	
6D23	A6061	母材	200	20-230	37.5	1.6	1.7	
6D24	A6061	母材	200	20-230	36.4	1.5	1.5	

Table A3 (4/4) 破壊靱性試験片の予亀裂導入条件と予亀裂長さ

6DW13	A6061	溶接	RT	23-230	29.9	1.8	1.7	非照射材試験
6DW14	A6061	溶接	RT	20-230	31.1	1.7	1.7	
6DW15	A6061	溶接	RT	20-230	30.2	1.7	1.7	
6DW16	A6061	溶接	100	20-230	29.7	1.7	1.6	
6DW17	A6061	溶接	100	20-230	30.4	1.6	1.7	
6DW18	A6061	溶接	100	20-230	30.2	1.7	1.6	
6DW19	A6061	溶接	150	20-230	30.8	1.6	1.7	
6DW20	A6061	溶接	150	20-230	30.3	1.7	1.6	
6DW21	A6061	溶接	150	20-230	30.4	1.7	1.6	
6DW22	A6061	溶接	200	20-230	29.0	1.7	1.6	
6DW23	A6061	溶接	200	20-230	30.0	1.6	1.7	
6DW24	A6061	溶接	200	20-230	30.5	1.7	1.7	

Table A4 (1/2) 破壊靱性試験結果 (A5052 母材)

試験片番号	CT25	CT26	CT27	CT28	CT29	CT30
項目						
試験片材質	A5052BM	A5052BM	A5052BM	A5052BM	A5052BM	A5052BM
試験温度 °C	15°C	15°C	15°C	100°C	100°C	100°C
試験片厚さ B mm	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
試験片実厚さ B_N mm	16.0	16.0	12.8	16.0	16.0	12.8
試験片幅 W mm	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
初期亀裂長さ a_0 mm	18.8	18.9	18.8	18.8	18.8	18.9
初期リガメント b_0 mm	13.2	13.1	13.2	13.2	13.2	13.1
延性亀裂進展量 Δa mm	3.54	2.26	3.05	2.26	3.22	2.73
ヤング率 E N/mm ² kgf/mm ²	7000	7000	7000	7000	7000	7000
降伏強さ σ_y N/mm ² kgf/mm ²	8.0	8.0	8.0	9.1	9.1	9.1
引張り強さ σ_u N/mm ² kgf/mm ²	19.6	19.6	19.6	18.5	18.5	18.5
有効降伏点 σ_f N/mm ² kgf/mm ²	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
J_Q kj/m ² kgf/mm	24.0	24.0	17.0	28.0	32.0	14.0
dJ/da kgf/mm ²	17.0	18.0	11.0	16.0	15.0	11.0
K_Q kgf/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
$X=25 J_Q/\sigma_f, B_N \geq X$?	43.4/N	43.4/N	30.7/N	50.7/N	57.9/N	25.3/N
$y=25 J_Q/\sigma_f, b_0 \geq y$?	43.4/N	43.4/N	30.7/N	50.7/N	57.9/N	25.3/N
$dJ/da \leq \sigma_f$?	17.0/N	18.0/N	11.0/Y	16.0/N	15.0/N	11.0/Y
J_{IC} kj/m ² kgf/mm	-	-	-	-	-	-
K_{IC} (J) N/mm ^{3/2} kgf/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
備考			10% Groove			10% Groove

Table A4 (2/2) 破壊靱性試験結果 (A5052 母材)

試験片番号	CT31	CT32	CT33	CT34	CT35	CT36
項目						
試験片材質	A5052BM	A5052BM	A5052BM	A5052BM	A5052BM	A5052BM
試験温度 °C	150°C	150°C	150°C	200°C	200°C	200°C
試験片厚さ B mm	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
試験片実厚さ B _N mm	16.0	16.0	12.8	16.0	16.0	12.8
試験片幅 W mm	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
初期亀裂長さ a ₀ mm	19.0	18.8	19.1	18.8	19.0	18.8
初期リガメント b ₀ mm	13.0	13.2	12.9	13.2	13.0	13.2
延性亀裂進展量 Δ a mm	2.37	2.70	2.55	1.41	1.43	1.77
ヤング率 E N/mm ²						
kgf/mm ²	7000	7000	7000	7000	7000	7000
降伏強さ σ _y N/mm ²						
kgf/mm ²	9.2	9.2	9.2	8.2	8.2	8.2
引張り強さ σ _u N/mm ²						
kgf/mm ²	16.0	16.0	16.0	13.0	13.0	13.0
有効降伏点 σ _f N/mm ²						
kgf/mm ²	12.6	12.6	12.6	10.6	10.6	10.6
J _Q kj/m ²						
kgf/mm	48.0	35.0	24.0	-	-	-
dJ/da kgf/mm ²	19.0	20.0	18.0	-	-	-
K _Q kgf/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
X=25 J _Q /σ _f , B _N ≥ X ?	95.2/N	69.4/N	47.6/N	-	-	-
y=25 J _Q /σ _f , b ₀ ≥ y ?	95.2/N	69.4/N	47.6/N	-	-	-
dJ/da ≤ σ _f ?	19.0/N	20.0/N	18.0/N	-	-	-
J _{IC} kj/m ²						
kgf/mm	-	-	-	-	-	-
K _{IC} (J) N/mm ^{3/2}						
kgf/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
備考			10% Groove			10% Groove

Table A5 (1/2) 破壊靱性試験結果 (A5052 溶接継手)

試験片番号	5DW25	5DW26	5DW27	5DW28	5DW29	5DW30
項目						
試験片材質	A5052WM	A5052WM	A5052WM	A5052WM	A5052WM	A5052WM
試験温度 °C	24°C	24°C	24°C	100°C	100°C	100°C
試験片厚さ B mm	16.0	16.0	16.0	15.99	15.99	16.0
試験片実厚さ B_N mm	12.81	12.83	12.79	12.78	12.80	12.78
試験片幅 W mm	31.92	32.02	31.98	32.04	32.02	31.95
初期亀裂長さ a_0 mm	19.36	19.07	19.03	19.57	19.06	19.64
初期リガメント b_0 mm	12.56	12.95	12.95	12.54	12.96	12.31
延性亀裂進展量 Δa mm	3.79	3.76	3.35	3.10	3.74	3.45
ヤング率 E N/mm ²						
kgf/mm ²	8600	8600	8600	9400	9400	9400
降伏強さ σ_y N/mm ²						
kgf/mm ²	7.7	7.7	7.7	8.9	8.9	8.9
引張り強さ σ_u N/mm ²						
kgf/mm ²	19.1	19.1	19.1	19.9	19.9	19.9
有効降伏点 σ_f N/mm ²						
kgf/mm ²	13.4	13.4	13.4	14.4	14.4	14.4
J_Q kj/m ²						
kgf/mm	5.9	6.9	5.8	8.1	4.2	5.0
dJ/da kgf/mm ²	-	-	-	-	-	-
K_Q kgf/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
$X=25 J_Q / \sigma_f, B_N \geq X$?	11.0/Y	12.9/N	10.8/Y	14.1/N	7.29/Y	8.7/Y
$y=25 J_Q / \sigma_f, b_0 \geq y$?	11.0/Y	12.9/N	10.8/Y	14.1/N	7.29/Y	8.7/Y
$dJ/da \leq \sigma_f$?	-	-	-	-	-	-
J_{IC} kj/m ²						
kgf/mm	5.9	(6.9)	5.8	-	4.2	5.0
K_{IC} (J) N/mm ^{3/2}						
kgf/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
備考						

Table A5 (2/2) 破壊靱性試験結果 (A5052 溶接継手)

試験片番号	5DW31	5DW32	5DW33	5DW34	5DW35	5DW36
項目						
試験片材質	A5052WM	A5052WM	A5052WM	A5052WM	A5052WM	A5052WM
試験温度 °C	150°C	150°C	150°C	200°C	200°C	200°C
試験片厚さ B mm	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
試験片実厚さ B _N mm	12.78	12.81	12.79	12.81	12.81	12.79
試験片幅 W mm	31.95	31.90	31.95	32.02	32.05	31.94
初期亀裂長さ a ₀ mm	19.04	18.58	18.83	19.07	18.97	18.69
初期リガメント b ₀ mm	12.91	13.32	13.12	12.95	13.08	13.25
延性亀裂進展量 Δ a mm	2.98	3.68	3.11	2.71	2.94	2.76
ヤング率 E N/mm ²						
kgf/mm ²	7700	7700	7700	7000	7000	7000
降伏強さ σ _y N/mm ²						
kgf/mm ²	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
引張り強さ σ _u N/mm ²						
kgf/mm ²	17.0	17.0	17.0	16.1	16.1	16.1
有効降伏点 σ _f N/mm ²						
kgf/mm ²	12.9	12.9	12.9	12.1	12.1	12.1
J _Q kj/m ²						
kgf/mm	8.2	12.7	11.5	10.4	6.7	8.9
dJ/da kgf/mm ²	-	-	-	-	-	-
K _Q kgf/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
X=25 J _Q /σ _f , B _N ≥ X ?	15.9/N	24.6/N	21.3/N	21.5/N	13.8/N	18.4/N
y=25 J _Q /σ _f , b ₀ ≥ y ?	15.9/N	24.6/N	21.3/N	21.5/N	13.8/N	18.4/N
dJ/da ≤ σ _f ?	-	-	-	-	-	-
J _{IC} kj/m ²						
kg/mm	-	-	-	-	-	-
K _{IC} (J) N/mm ^{3/2}						
kgf/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
備考						

Table A6 (1/2) 破壊靱性試験結果 (A6061 溶接継手)

試験片番号	6DW13	6DW14	6DW15	6DW16	6DW17	6DW18
項目						
試験片材質	A6061WM	A6061WM	A6061WM	A6061WM	A6061WM	A6061WM
試験温度 °C	24°C	24°C	24°C	100°C	100°C	100°C
試験片厚さ B mm	16.08	15.96	15.95	15.96	15.99	15.98
試験片実厚さ B_N mm	13.06	13.01	13.02	13.05	13.00	12.96
試験片幅 W mm	31.96	31.97	31.96	31.99	31.96	31.96
初期亀裂長さ a_0 mm	18.86	19.12	18.86	18.75	18.93	18.85
初期リガメント b_0 mm	13.10	12.85	13.10	13.24	13.03	13.11
延性亀裂進展量 Δa mm	4.47	4.04	4.43	3.94	3.77	3.97
ヤング率 E N/mm ²	84000	84000	84000	65000	65000	65000
kgf/mm ²	8571	8571	8571	6633	6633	6633
降伏強さ σ_y N/mm ²	97	97	97	83	83	83
kgf/mm ²	9.9	9.9	9.9	8.5	8.5	8.5
引張り強さ σ_u N/mm ²	160	160	160	157	157	157
kgf/mm ²	16.3	16.3	16.3	16.0	16.0	16.0
有効降伏点 σ_f N/mm ²	129	129	129	120	120	120
kgf/mm ²	13.1	13.1	13.1	12.2	12.2	12.2
J_Q kj/m ²	53.4	56.0	52.7	59.3	65.0	67.3
kgf/mm	5.4	5.7	5.4	6.1	6.6	6.9
dJ/da kgf/mm ²	-	-	-	-	-	-
K_Q kgf/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
$X=25 J_Q / \sigma_f, B_N \geq X$?	10.3/Y	10.9/Y	10.3/Y	12.5/Y	13.5/Y	14.1/Y
$y=25 J_Q / \sigma_f, b_0 \geq y$?	10.3/Y	10.9/Y	10.3/Y	12.5/Y	13.5/Y	14.1/Y
$dJ/da \leq \sigma_f$?	2.78/Y	3.55/Y	2.78/Y	4.37/Y	3.62/Y	4.14/Y
J_{IC} kj/m ²	53.4	56.0	52.7	59.3	(65.0)	-
kgf/mm	5.4	5.7	5.4	6.1	(6.6)	-
K_{IC} (J) N/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
kgf/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
備考						

Table A6 (2/2) 破壊靱性試験結果 (A6061 溶接継手)

試験片番号	6DW19	6DW20	6DW21	6DW22	6DW23	6DW24
項目						
試験片材質	A6061WM	A6061WM	A6061WM	A6061WM	A6061WM	A6061WM
試験温度 °C	150°C	150°C	150°C	200°C	200°C	200°C
試験片厚さ B mm	15.96	15.97	15.99	15.98	15.97	16.03
試験片実厚さ B_N mm	12.96	12.87	13.02	12.98	13.00	12.80
試験片幅 W mm	31.96	31.95	31.96	31.97	31.98	32.00
初期亀裂長さ a_0 mm	19.03	18.88	18.95	18.53	18.84	19.01
初期リガメント b_0 mm	12.93	13.07	13.01	13.44	13.14	12.99
延性亀裂進展量 Δa mm	3.66	3.76	3.25	3.25	3.43	3.73
ヤング率 E N/mm ²	65000	65000	65000	60000	60000	60000
kgf/mm ²	6633	6633	6633	6122	6122	6122
降伏強さ σ_y N/mm ²	79	79	79	70	70	70
kgf/mm ²	8.1	8.1	8.1	7.1	7.1	7.1
引張り強さ σ_u N/mm ²	141	141	141	120	120	120
kgf/mm ²	14.4	14.4	14.4	12.2	12.2	12.2
有効降伏点 σ_f N/mm ²	110	110	110	95	95	95
kgf/mm ²	11.2	11.2	11.2	9.7	9.7	9.7
J_Q kj/m ²	72.5	77.0	66.7	66.3	61.5	59.0
kgf/mm	7.4	7.9	6.8	6.8	6.3	6.0
dJ/da kgf/mm ²	-	-	-	-	-	-
K_Q kgf/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
$X=25 J_Q/\sigma_f, B_N \geq X$?	16.5/N	17.6/N	15.2/N	17.5/N	16.2/N	15.4/N
$y=25 J_Q/\sigma_f, b_0 \geq y$?	16.5/N	17.6/N	15.2/N	17.5/N	16.2/N	15.4/N
$dJ/da \leq \sigma_f$?	4.44/Y	3.58/Y	5.59/Y	3.43/Y	4.15/Y	2.66/Y
J_{IC} kj/m ²	-	-	-	-	-	-
kgf/mm	-	-	-	-	-	-
K_{IC} (J) N/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
kgf/mm ^{3/2}	-	-	-	-	-	-
備考						

Table A7 (1/2) 破壊靱性試験結果 (A6061 母材)

試験片番号	6D13	6D14	6D15	6D16	6D17	6D18
項目						
試験片材質	A6061BM	A6061BM	A6061BM	A6061BM	A6061BM	A6061BM
試験温度 °C	24°C	24°C	24°C	100°C	100°C	100°C
試験片厚さ B mm	16.01	16.01	16.01	16.01	16.01	16.01
試験片実厚さ B_N mm	12.80	12.78	12.78	12.80	12.81	12.81
試験片幅 W mm	32.06	32.10	31.96	32.01	32.01	32.01
初期亀裂長さ a_0 mm	18.14	18.21	17.99	17.94	18.56	18.32
初期リガメント b_0 mm	13.92	13.89	13.97	14.07	13.54	13.69
延性亀裂進展量 Δa mm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ヤング率 E N/mm ²						
kgf/mm ²	6600	6600	6600	8000	8000	8000
降伏強さ σ_y N/mm ²						
kgf/mm ²	29.1	29.1	29.1	28.4	28.4	28.4
引張り強さ σ_u N/mm ²						
kgf/mm ²	31.0	31.0	31.0	29.4	29.4	29.4
有効降伏点 σ_f N/mm ²						
kgf/mm ²	30.1	30.1	30.1	28.9	28.9	28.9
J_Q kj/m ²						
kgf/mm	(1.50)	(1.43)	(1.37)	(1.40)	(0.99)	(0.91)
dJ/da kgf/mm ²	-	-	-	-	-	-
K_Q kgf/mm ^{3/2}	104.4	101.9	99.7	111.0	93.2	89.2
$X=25 J_Q/\sigma_f, B_N \geq X$?	1.24/Y	1.19/Y	1.13/Y	1.21/Y	0.85/Y	0.82/Y
$y=25 J_Q/\sigma_f, b_0 \geq y$?	1.24/Y	1.19/Y	1.13/Y	1.21/Y	0.85/Y	0.82/Y
dJ/da $\leq \sigma_f$?	-	-	-	-	-	-
J_{IC} kj/m ²						
kgf/mm	(1.50)	(1.43)	(1.37)	(1.40)	(0.99)	(0.91)
K_{IC} (J) N/mm ^{3/2}						
kgf/mm ^{3/2}	104.4	101.9	99.7	111.0	93.2	89.2
備考						

(J_Q値は $J_Q=(1-\nu^2)K_Q^2/E$ により求めた)

Table A7 (2/2) 破壊靱性試験結果 (A6061 母材)

試験片番号	6D19	6D20	6D21	6D22	6D23	6D24
項目						
試験片材質	A6061BM	A6061BM	A6061BM	A6061BM	A6061BM	A6061BM
試験温度 °C	150°C	150°C	150°C	200°C	200°C	200°C
試験片厚さ B mm	16.01	16.01	16.01	16.01	16.01	15.98
試験片実厚さ B_N mm	12.81	12.76	12.82	12.79	12.79	12.98
試験片幅 W mm	32.08	32.10	32.08	32.02	32.06	31.99
初期亀裂長さ a_0 mm	18.35	18.16	18.30	17.69	18.38	18.15
初期リガメント b_0 mm	13.73	13.94	13.78	14.33	13.68	13.84
延性亀裂進展量 Δa mm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ヤング率 E N/mm^2						
kgf/mm ²	6800	6800	6800	6000	6000	6000
降伏強さ σ_y N/mm^2						
kgf/mm ²	27.3	27.3	27.3	25.2	25.2	25.2
引張り強さ σ_u N/mm^2						
kgf/mm ²	27.9	27.9	27.9	26.0	26.0	26.0
有効降伏点 σ_f N/mm^2						
kgf/mm ²	27.6	27.6	27.6	25.6	25.6	25.6
J_Q kJ/m^2						
kgf/mm	(1.85)	(1.24)	(1.45)	(1.81)	(1.56)	(1.54)
dJ/da kgf/mm^2	-	-	-	-	-	-
K_Q $kgf/mm^{3/2}$	107.3	96.2	104.2	109.1	101.5	100.9
$X=25 J_Q/\sigma_f, B_N \geq X$?	(1.67/Y)	(1.12/Y)	(1.31/Y)	(1.76/Y)	(1.52/Y)	(1.50/Y)
$y=25 J_Q/\sigma_f, b_0 \geq y$?	(1.67/Y)	(1.12/Y)	(1.31/Y)	(1.76/Y)	(1.52/Y)	(1.50/Y)
$dJ/da \leq \sigma_f$?	-	-	-	-	-	-
J_{IC} kJ/m^2						
kgf/mm	(1.85)	(1.24)	(1.45)	(1.81)	(1.56)	(1.54)
K_{IC} (J) $N/mm^{3/2}$						
kgf/mm ^{3/2}	107.3	96.2	104.2	109.1	101.5	100.9
備考						

(J_Q 値は $J_Q = (1 - \nu^2)K_Q^2/E$ により求めた)

A. 6 走査電子顕微鏡による破面観察結果

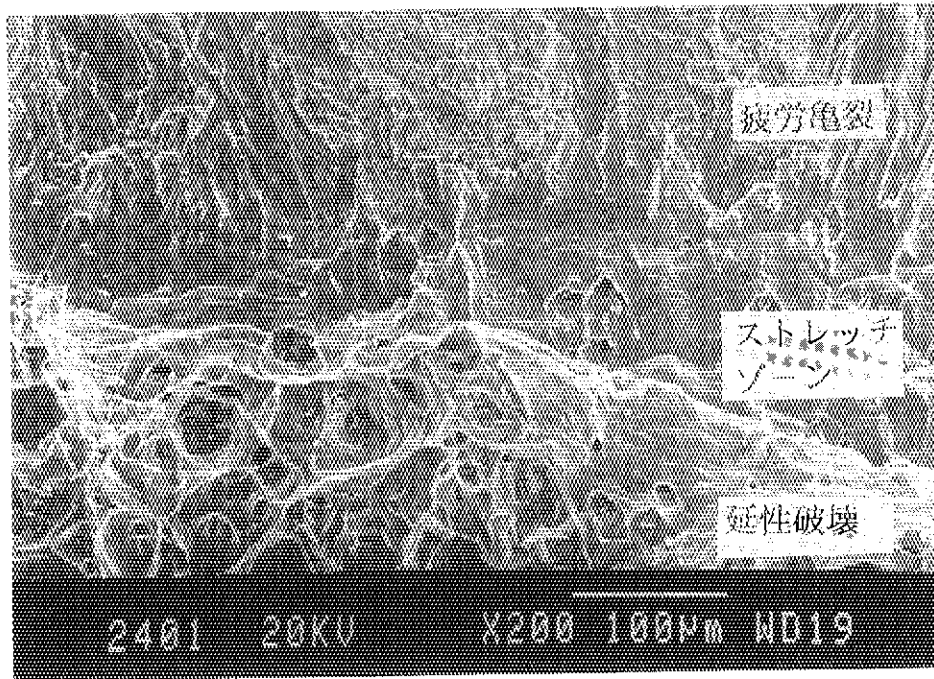
破壊の微視的様相を検討するため、走査電子顕微鏡による破面観察を行った。破壊靱性試験片とシャルピー試験片の一部を利用し、試験片の中心線上で観察した。破壊靱性試験片については、疲労予亀裂、ストレッチゾーン、延性破壊部を観察した。シャルピー試験片については、ノッチ先端付近を観察した。倍率は100～1000倍とした。

Fig. A2に A5052母材の室温試験の疲労亀裂先端と延性破壊部のフラクトグラフィーを示す。通常、延性材料の破壊靱性試験では、延性亀裂が進展を開始する前に、疲労亀裂先端が鈍化し見掛けの亀裂進展が生じる。亀裂先端の鈍化は、亀裂先端部での剪断方向への塑性変形（すべり）により生じるとされている。鈍化した領域では、ストレッチゾーンといわれる無特徴な破面が生じる。Fig. A2に示すように、疲労亀裂先端ではストレッチゾーンが観察される。さらに、その先には延性破壊の特徴であるディンプルが見られる。ストレッチゾーンの先から延性破壊が数mm進展した後も同様なディンプル破面が観察される。

Fig. A3は A6061溶接試験片について上記と同様の破面を示したものである。この破面にも疲労亀裂にストレッチゾーンが観察されるが、A5052母材に比べてストレッチゾーン幅はかなり小さいことが図から分かる。その先にはディンプルが観察される。溶接金属の破面の特徴はディンプルの寸法が母材よりやや小さいことである。

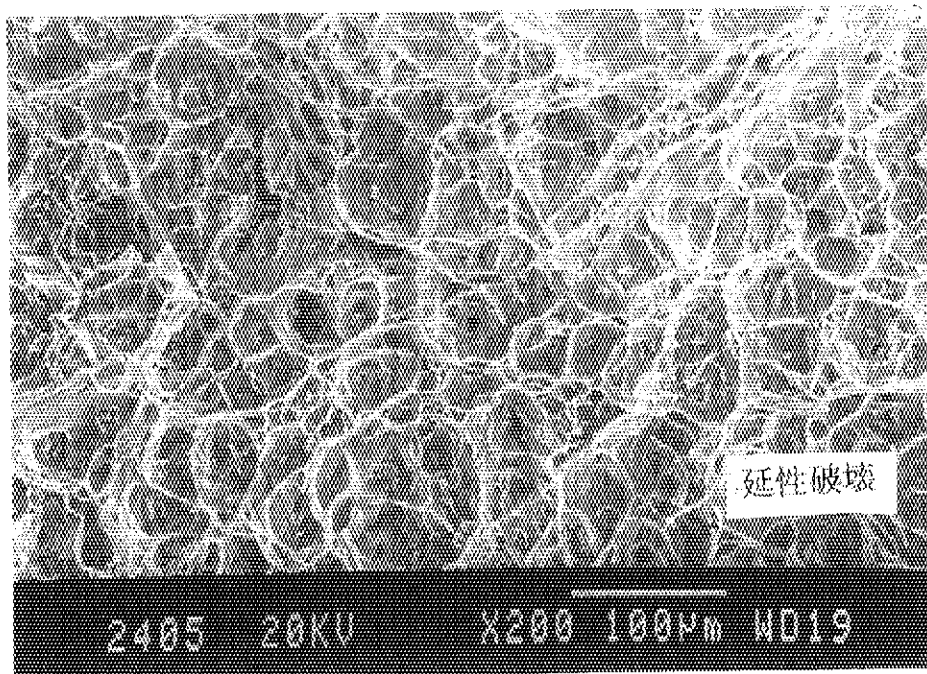
Fig. A4は A5052母材について破面観察したものである。A6061母材の場合、荷重-変位曲線が0.3～0.4mm弾性的に変形した直後に亀裂が急速に進展しほとんど分離破断した。一方、A5052母材、A6061溶接継手およびA6061溶接継手の場合、延性亀裂進展開始点は荷重-変位曲線上で変位が約2mmでほぼ最大荷重付近である。従って、A5052母材および溶接継手に比較してA6061母材では疲労亀裂先端の塑性変形もかなり小さい。Fig. A4に示すA6061母材の破面から明らかのように、延性亀裂開始前のストレッチゾーンは明瞭に現れていない。延性亀裂はA6061母材では急速に進展したが破面のディンプルの様相は、A5052とほとんど同じであり、ディンプルの寸法も同程度である。

Fig. A5は、A6061のシャルピー試験片についてノッチ先端部の破面を観察したものであり、ノッチ先端からすぐに破壊靱性試験片と同様のディンプル破面が発生し、破面全体に広がっている。



試験片 No. : CT 2 5
A5052 母材, RT

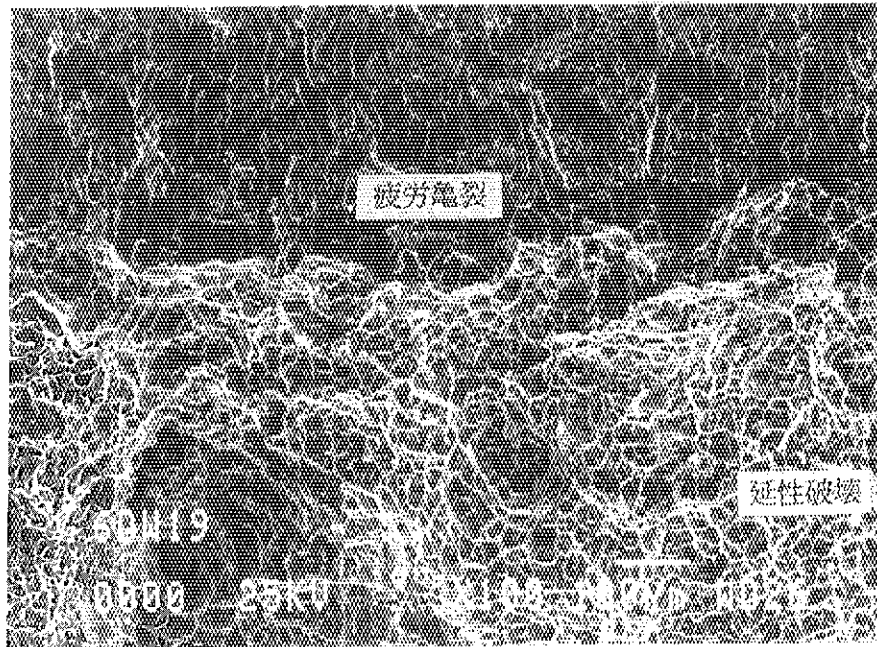
観察位置 : 疲労亀裂先端部
(中央)



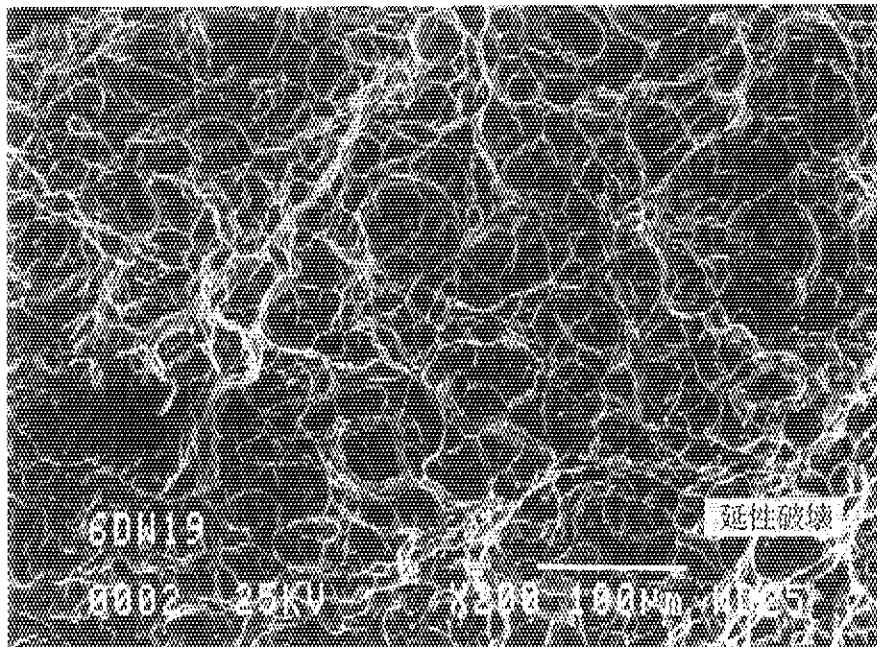
試験片 No. : CT 2 5
A5052 母材, RT

観察位置 : 疲労亀裂先端
から 2mm (中央)

Fig. A2 A5052 母材破壊靱性試験片の疲労亀裂先端部と延性亀裂破面

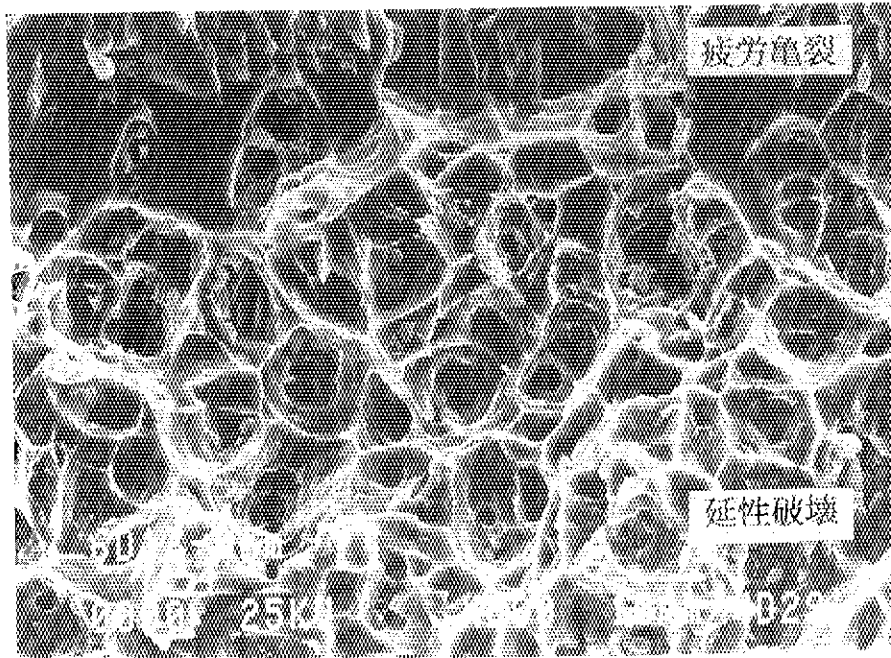


試験片 No. : 6 DW 1 9 観察位置 : 疲労亀裂先端部
A6061 溶接, 150°C (中央)



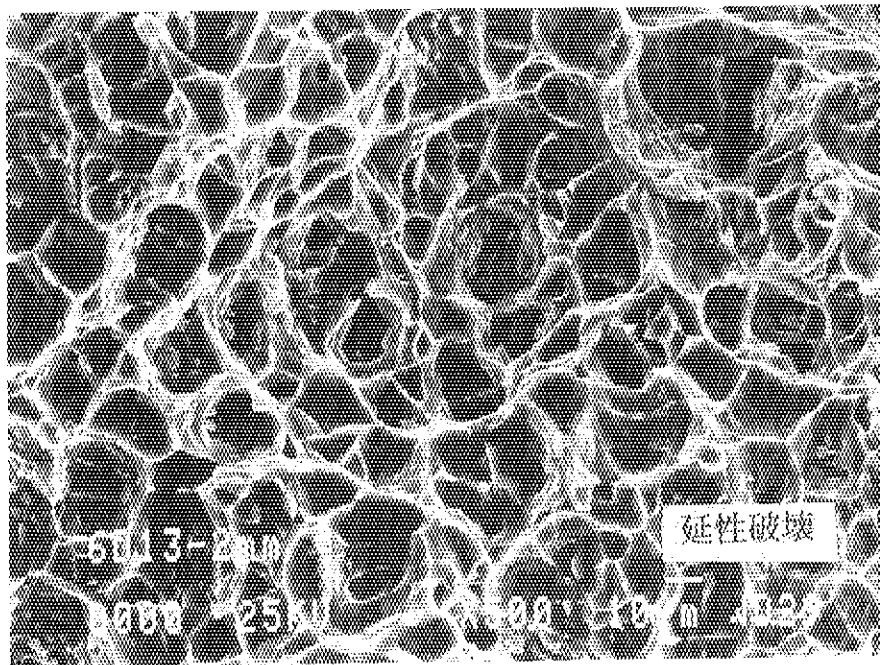
試験片 No. : 6 DW 1 9 観察位置 : 疲労亀裂先端
A6061 溶接, 150°C から 2mm (中央)

Fig. A3 A6061 溶接継手破壊靱性試験片の疲労亀裂先端部と延性亀裂破面



試験片 No. : 6 D 1 3
A6061 母材, RT

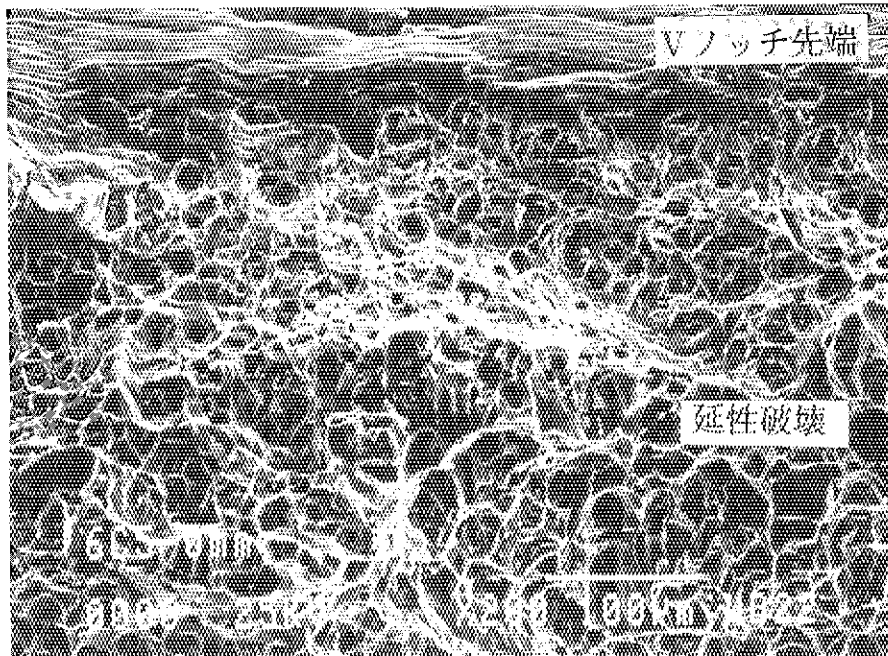
観察位置 : 疲労亀裂先端部
(中央)



試験片 No. : 6 D 1 3
A6061 母材, RT

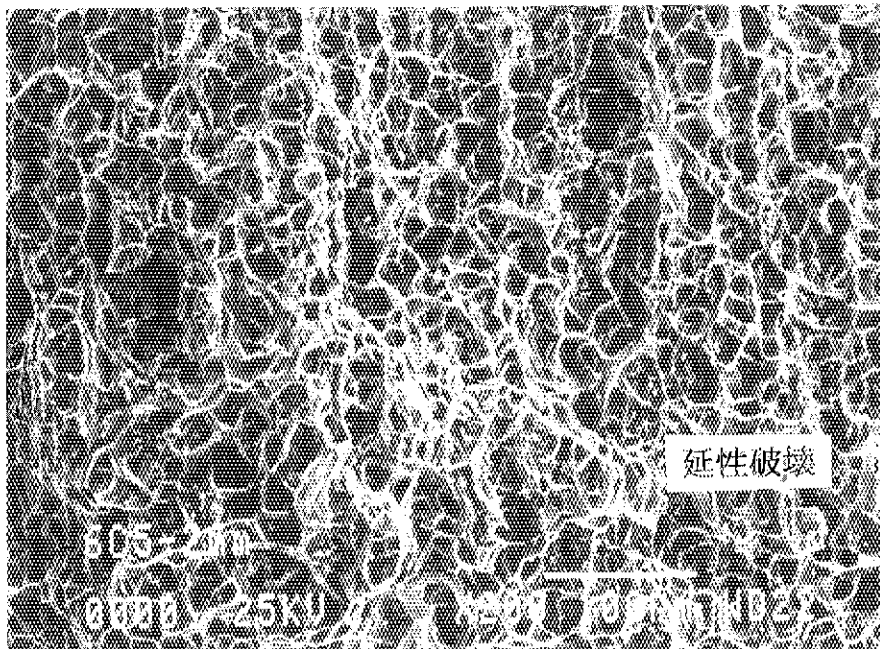
観察位置 : 疲労亀裂先端
から 2mm

Fig. A4 A6061 母材破壊靱性試験片の疲労亀裂先端部と延性亀裂破面



試験片 No. : 6 C 5
A6061 母材, RT

観察位置 : 疲労亀裂先端部
(中央)



試験片 No. : 6 C 5
A6061 母材, RT

観察位置 : 疲労亀裂先端
から 2mm

Fig. A5 A6061 母材シャルピー衝撃試験片の延性破壊破面