

(昭和 57 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

# Al 合金 A5083-0 材突合せ継手のブローホール 許容欠陥率と JIS 規格との対応について

正員 野 崎 甚 蔵\* 正員 阪 井 大 輔\*\*  
正員 矢 島 浩\*\*\* 正員 安 藤 清\*\*\*  
平 田 隆 明\*\*\*

Allowable Blow Holes for A 5083-0 Aluminum Butt Welded Joints  
and its Correlation with JIS Code

by Jinzoo Nozaki, *Member* Daisuke Sakai, *Member*  
Hiroshi Yajima, *Member* Kiyoshi Andoo, *Member*  
Takaaki Hirata

## Summary

Weld defects such like blow holes, porosities, etc. are not likely to become high stress raisers compared with planar defects like incomplete fusion. But, if their size and number are very large, fatigue strength becomes lower. Radiographic test has often been used to assure the integrity of welded joints. However, grade of defects classified by JIS Code does not have sufficient correlation with actual fracture strength.

Then, both radiographic tests and fatigue tests were carried out for A 5083-0 aluminum butt welded joints with porosities. The correlation between JIS Code and defect rate in X-ray photograph, and the correlation between defect rate in X-ray photograph and defect-area rate in fracture surface were made clearer. In addition, allowable defect-area rates in fracture surface and their corresponding JIS grade of defects were determined for respective surface treatment of butt welded joints.

## 1 ま え が き

本報では、Al 合金 (A 5083-0) 製独立型球形タンク方式 LNG 運搬船の球殻溶接継手の健全性に着目し、特にブローホールを有する Al 合金 A 5083-0 材の突合せ溶接継手高サイクル疲労強度について報告する。

代表的な溶接欠陥として問題となるのは、溶込み不良などの平面状欠陥ならびにブローホールなどの球状欠陥である。欠陥形状の特異性から欠陥検査には、別報<sup>1)</sup>に述べるように前者に対して超音波探傷試験 (UT) を、後者に対しては放射線透過試験 (RT) が用いられている。前者は絶対に許されるべきものではないが、後者は前者に比べると応力集中は小さく問題となりにくい。しかし、その欠陥の大きさが大きくなったり、その数が多くなると、疲労強度が著しく低下することはよく知られ

ている<sup>2)~13)</sup>。JIS 規格<sup>14)</sup>では、欠陥点数によってブローホールを等級分類しているが、実際の破壊現象との対応が必ずしも明確ではない<sup>9)~10)</sup>。また、従来の多くの研究では、主に余盛なし (flushed) の欠陥継手の疲労強度係数と欠陥率との関係が求められており、欠陥の影響がややもすると厳しく評価されている傾向がある。実用上は、余盛付きの欠陥継手の疲労強度評価が重要であるが、このような研究は極めて数が少なく<sup>12),13)</sup>、余盛あり (as welded) もしくは dressed の欠陥継手の疲労強度係数と欠陥率の関係は十分に把握できていないといえる。

そこで、ブローホールを有する Al 合金 A 5083-0 材の突合せ溶接継手試験片 (as welded ならびに dressed) を製作し、X線検査ならびに疲労試験を実施し、JIS 欠陥等級と X線欠陥率との関係および X線欠陥率と局部的破面欠陥率との関係を検討した。さらに、突合せ継手の仕上げ方法 (as welded, dressed, flushed) によってブローホールに対する感受性が異なることに着目し、各種仕上げ方法に対する許容欠陥率ならびにそれらの JIS

\* 三菱重工業(株)船舶・鉄構事業本部

\*\* 三菱重工業(株)長崎造船所

\*\*\* 三菱重工業(株)長崎研究所

Table 1 Classification of defects in aluminum welded joints (JIS Z 3105-1977)

| Grade of Defects                  | Evaluation Points<br>Thickness (mm) | 2      | 3 | 4           | 5 | 6         | 7 | 8         | 9 | 11         | 15 | 22 | 25 | 29 | 43 | 50 | 57    | Test Area (mm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------------|-------------------------------------|--------|---|-------------|---|-----------|---|-----------|---|------------|----|----|----|----|----|----|-------|------------------------------|
|                                   |                                     | 2      | 3 | 4           | 5 | 6         | 7 | 8         | 9 | 11         | 15 | 22 | 25 | 29 | 43 | 50 | 57    |                              |
| Grade of Defects                  | t < 5                               | 1      | 2 |             | 3 |           |   | 4         |   |            |    |    |    |    |    |    | 10x10 |                              |
|                                   | 5 ≤ t < 10                          | 1      | 2 |             | 3 |           |   | 4         |   |            |    |    |    |    |    |    |       |                              |
|                                   | 10 ≤ t < 20                         | 1      | 2 |             | 3 |           |   | 4         |   |            |    |    |    |    |    |    |       |                              |
|                                   | 20 ≤ t < 40                         | 1      | 2 |             | 3 |           |   | 4         |   |            |    |    |    |    |    |    |       |                              |
|                                   | 40 ≤ t < 80                         | 1      | 2 |             | 3 |           |   | 4         |   |            |    |    |    |    |    |    |       |                              |
| Evaluation Points for Each Defect | t > 80                              | 1      | 2 |             | 3 |           |   | 4         |   |            |    |    |    |    |    |    | 10x30 |                              |
|                                   | Defect Size (mm)                    | D ≤ 1  |   | 1 < D ≤ 2   |   | 2 < D ≤ 4 |   | 4 < D ≤ 8 |   | 8 < D ≤ 10 |    |    |    |    |    |    |       |                              |
| Maximum Negligible Defect Size    | Evaluation Points                   | 1      |   | 2           |   | 4         |   | 8         |   | 16         |    |    |    |    |    |    |       |                              |
|                                   | Plate Thickness, t (mm)             | t < 20 |   | 20 ≤ t < 40 |   | t > 40    |   |           |   |            |    |    |    |    |    |    |       |                              |
|                                   | Negligible Size (mm)                | 0.4    |   | 0.6         |   | 0.015 t   |   |           |   |            |    |    |    |    |    |    |       |                              |

- Note 1) Testing Method: X-ray  
 2) Defect Shape: Spherical  
 3) Grade 4, when more than three times test area of grade 3 are connected continuously.  
 4) Grade 4, when there is at least one defect of more than 10mm or one third plate thickness.  
 5) Grade 4, when there is at least one defect of either cracking, incomplete fusion, copper inclusion or more than 2mm oxide inclusion.

欠陥等級との対応を検討した。

## 2 欠陥等級分類と合否判定基準における問題点

Al 合金の溶接は、多湿環境ではブローホールの発生が懸念される。そこで、船級協会（例えば NK, NV）との取り決めでは、ブローホールなどの第 1 種欠陥に対する合否判定基準として、as welded 継手ならびに dressed 継手に対して JIS : Z 3105-1977 の欠陥等級 1 級ならびに 2 級を合格、3 級以下を不合格とすることにしている。不合格と判定された箇所は、はつり取って再度溶接しなければならない。しかしながら、補修溶接によってかえって悪くなる場合（靱性劣化、溶接残留応力など）もあり、慎重に判定する必要がある。JIS : Z 3105-1977 では、Table 1 に示すように放射線透過写真から、欠陥度を点数表示して等級分類している。第 1 種欠陥としては、ブローホールの他にタングステン巻込みと小さな酸化物の巻込みがある。鉄鋼の場合と異なり、第 2 種欠陥はすべて第 3 種欠陥とともに 4 級とされている。

しかしながら、ブローホールに対する欠陥の合否判定基準（特に as welded 継手と dressed 継手が同級であること）は根拠に乏しく、as welded 継手に対しては厳し過ぎるものと判断される<sup>12),13)</sup>。この種の問題に対する障害としては、3 次元的な X 線透過写真による欠陥率  $\alpha_x$ （以下 X 線欠陥率と称する）と 2 次元的に計測される破面欠陥率  $\alpha_s$  とを対応づけなければならないこと、さらに欠陥の等級分類が不連続であることなどがある。

したがって、欠陥の定量的な許容限

度を求め、合否判定基準が緩和できれば、合理的な品質管理が可能となる。

## 3 ブローホールを有する Al 合金突合せ継手の X 線検査ならびに疲労試験

JIS の欠陥等級と実際の破壊強度との対応を把握するため、JIS 3 級ならびに 4 級（4 級でも非常に悪いものを 4 級と称しこれも含める）相当のブローホールを有する Al 合金突合せ溶接継手試験片 (as welded)、および JIS 2 級ならびに 3 級相当のブローホールを有する Al 合金突合せ溶接継手試験片 (dressed) を製作し、X 線検査ならびに疲労試験を合わせて実施した。

### 3.1 供試材ならびに継手試験片

供試材は板厚 40 mm の Al 合金 JIS : A 5083-0 材である。供試材の化学成分ならびに機械的性質を Table 2 に示す。

継手試験片は、長さ（圧延方向）250mm、幅 700mm の板 2 枚を突合せて横向き MIG 溶接したものから、約 5 枚ずつ採取し、Fig. 1 に示す形状に機械加工した。ブローホールは、Table 3 に示すように、最終層を除く適当な時期にペイントを塗布して、発生させた。

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of A 5083-0

|              | Chemical Composition (%) |                  |       |                  |                 |                   |       |       | Mechanical Properties                    |                                      |                 |
|--------------|--------------------------|------------------|-------|------------------|-----------------|-------------------|-------|-------|--|--------------------------------------|-----------------|
|              | Si                       | Fe <sup>4)</sup> | Cu    | Mn               | Mg              | Cr                | Zn    | Ti    | $\sigma_{0.2}$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_B$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\delta$<br>(%) |
| Code Value   | <0.40                    | <0.40            | <0.10 | 0.40<br>5<br>1.0 | 4.0<br>5<br>4.9 | 0.05<br>5<br>0.25 | <0.25 | <0.15 | 13~20                                    | 28~36                                | >16             |
| Actual Value | 0.15                     | 0.20             | 0.06  | 0.67             | 4.63            | 0.12              | 0.01  | 0.01  | 18                                       | 32                                   | 21              |

Note E=7200kgf/mm<sup>2</sup>, t=40mm

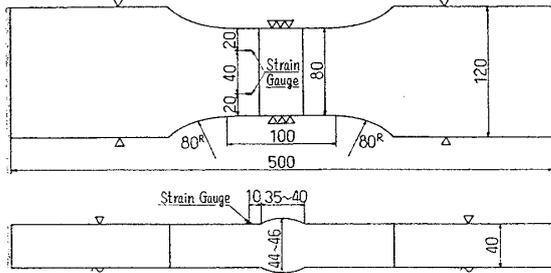


Fig. 1 Test specimen

Table 3 Typical welding condition of butt welded joints

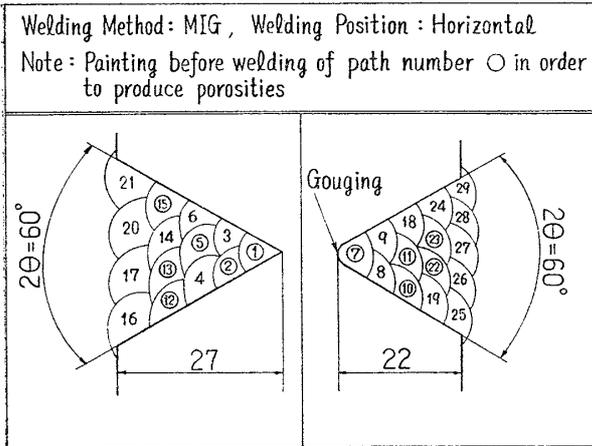


Table 4 Results of X-ray test and fatigue test of as welded joints

| Speci. No.<br>A-B(C) | Nominal Stress Range<br>S <sub>R</sub><br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | Fatigue Life<br>N <sub>f</sub><br>(x10 <sup>4</sup> cycles) | α <sub>x</sub> <sup>2)</sup><br>(%) | α <sub>s</sub> <sup>3)</sup><br>(%) |
|----------------------|--|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 10-1(3)              | 18.6   | 1.5   | 5.1                                 | 0                                   |
| 10-2(3)              | 18.7   | 1.5   | 5.9                                 | 0                                   |
| 10-3(4)              | 18.6   | 1.7   | 12.0                                | 13                                  |
| 14-1(3)              | 9.9  | 14.0  | 7.3                                 | 0                                   |
| 14-2(3)              | 9.9  | 11.7  | 9.9                                 | 0                                   |
| 14-3(3)              | 17.8   | 1.1   | 11.0                                | 0                                   |
| 14-4(3)              | 10.3   | 12.2  | 10.2                                | 0                                   |
| 16-1(4)              | 9.5  | 17.5  | 15.0                                | 0                                   |
| 16-2(4)              | 17.0   | 1.1   | 11.7                                | 0                                   |
| 18-1(4)              | 9.5  | 9.4   | 10.7                                | 0                                   |
| 18-2(4)              | 9.4  | 16.6  | 10.7                                | 3                                   |
| 20-1(4)              | 10.8   | 8.7   | 70.5                                | 14                                  |
| 21-1(4)              | 8.9  | 10.9  | 49.4                                | 0                                   |
| 21-2(4)              | 17.7   | 0.7   | 42.4                                | 26                                  |
| 21-3(4)              | 17.5   | 0.8   | 55.8                                | 37                                  |
| 21-4(4)              | 9.0  | 7.1   | 66.7                                | 0                                   |
| 21-5(4)              | 17.8   | 0.5   | 53.0                                | 52                                  |
| 22-1(4)              | 10.2   | 10.6  | 17.4                                | 0                                   |
| 22-2(4)              | 9.8  | 10.8  | 14.0                                | 0                                   |
| 22-3(4)              | 18.0   | 1.2   | 11.0                                | 0                                   |
| 22-4(4)              | 11.1   | 41.5  | 21.0                                | 0                                   |
| 22-5(4)              | 18.1   | 4.5   | 23.6                                | 14                                  |
| 24-1(4)              | 19.2   | 4.8   | 21.4                                | 0                                   |

Note 1) A: Plate No., B: Piece No., C: JIS Defect Grade  
 2) α<sub>x</sub>: Defect rate in X-ray photograph  
 3) α<sub>s</sub>: Defect-area rate in fracture surface

なお、試験片採取にあたっては、溶接継手部のX線写真から採取位置を決定した。試験片には、長さ 500 mm に対して 2~3 mm の角変形が生じていたので、凹側の板面を機械加工し、角変形量が 1mm 程度以下になるようにした。また、dressing 仕上げは、実タンク施工並みとした。

3.2 X線検査結果

各試験片のX線欠陥率 α<sub>x</sub>(%) を、Table 4 (as welded 継手) ならびに Table 5 (dressed 継手) に示す。α<sub>x</sub> は X 線フィルムから計算した面積欠陥率であり、Fig. 2 に示すように、試験片継手部板表面で検査視野に最もブローホールが含まれる箇所を計測し、(1)式によって算定した。

$$\alpha_x(\%) = 100 A_{XB} / A_X \quad (1)$$

ここで、

A<sub>XB</sub>: 検査視野内のブローホールの占める全投影断面積

Table 5 Results of X-ray test and fatigue test of dressed joints

| Speci. No.<br>A-B(C) | Nominal Stress Range<br>S <sub>R</sub><br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | Fatigue Life<br>N <sub>f</sub><br>(x10 <sup>4</sup> cycles) | α <sub>x</sub> <sup>2)</sup><br>(%) | α <sub>s</sub> <sup>3)</sup><br>(%) |
|----------------------|--|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1-1(2)               | 17.6   | 4.5   | 3.2                                 | 0                                   |
| 1-2(3)               | 9.7  | 50.0  | 6.1                                 | 0                                   |
| 1-3(4)               | 8.9  | 54.9  | 15.3                                | 0                                   |
| 5-1(4)               | 18.0   | 5.2   | 10.4                                | 0                                   |
| 5-2(2)               | 9.1  | 116.3   | 1.6                                 | 4                                   |
| 5-3(2)               | 18.6   | 3.1   | 3.3                                 | 0                                   |
| 5-4(2)               | 9.1  | 32.7  | 2.2                                 | 2                                   |
| 5-5(2)               | 17.8   | 3.3   | 2.3                                 | 0                                   |
| 7-1(3)               | 18.0   | 2.9   | 4.2                                 | 3                                   |
| 7-2(2)               | 9.8  | 22.8  | 2.5                                 | 0                                   |
| 11-1(3)              | 17.8   | 1.8   | 7.1                                 | 0                                   |
| 11-2(3)              | 8.1  | 54.0  | 10.1                                | 0                                   |
| 11-3(3)              | 18.6   | 5.9   | 10.7                                | 17                                  |
| 13-1(3)              | 11.4   | 25.7  | 6.9                                 | 0                                   |
| 13-2(4)              | 9.5  | 34.1  | 12.7                                | 0                                   |
| 13-3(3)              | 11.4   | 43.7  | 4.3                                 | 0                                   |
| 19-1(3)              | 18.4   | 3.8   | 5.4                                 | 0                                   |

Note 1) A: Plate No., B: Piece No., C: JIS Defect Grade  
 2) α<sub>x</sub>: Defect rate in X-ray photograph  
 3) α<sub>s</sub>: Defect-area rate in fracture surface  
 4) Dressed condition: 4~10 mm toe radius grinding treatment

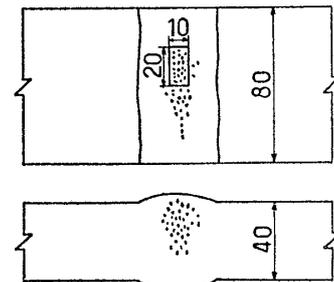


Fig. 2 Test area in X-ray photograph

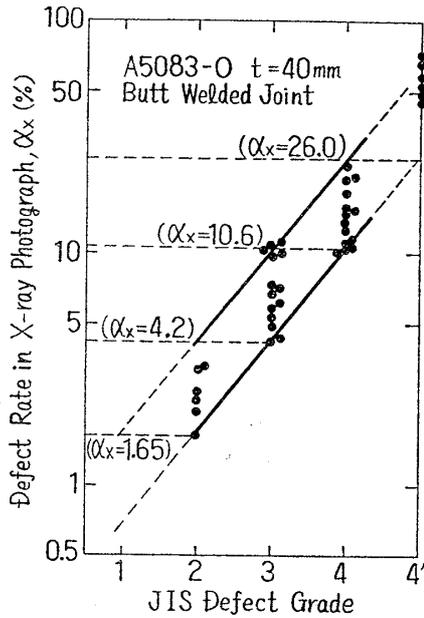


Fig. 3 Defect rate in X-ray photograph versus JIS defect grade

$A_X$ : 検査視野面積 (この場合 10 mm×20 mm)

なお, Table 4 および Table 5 に示した試験片符号 A-B (C) の A は板番号を, B は切出し番号を, C は X 線写真による JIS の欠陥等級をそれぞれ表わす。

Fig. 3 に本試験片の X 線欠陥率  $\alpha_x$  と JIS 欠陥等級との関係を示す。JIS 欠陥等級は点数表示であるにもかかわらず, JIS の各欠陥等級に対応する X 線欠陥率は互いに重複することなく, かつ X 線欠陥率の全領域を包含している。その意味で両者の対応は良い。なお, Fig. 3 中の括弧内の数字は, JIS の各欠陥等級に対応する X 線欠陥率  $\alpha_x$  の上限ならびに下限を表わす。

### 3.3 疲労試験結果

#### 3.3.1 試験方法

疲労試験は, 電気油圧式 100 ton 立型疲労試験機を用いて, 試験片の上下端を約 100mm 油圧チャックで直接つかんで実施した。試験条件は, 室温大気中で軸力片振り引張り荷重制御 (応力比:  $R=0$ ) とした。また, 応力条件は, 母材平行部の最大公称応力で 7.5 kgf/mm<sup>2</sup> ならびに 15kgf/mm<sup>2</sup> とし, 最小公称応力でいずれも 0kgf/mm<sup>2</sup> とした。ただし, 試験片 7-2(2) の場合の最大公称応力は, 8kgf/mm<sup>2</sup> とした。また, 荷重波形は正弦波とし, 繰返し速度は 6~10 Hz とした。

#### 3.3.2 試験結果

as welded 継手ならびに dressed 継手の疲労試験結果をそれぞれ Table 4 ならびに Table 5 に示す。なお, 試験片のわずかな角変形の影響を考慮して,  $R=0$  相当の母材平行部の公称応力範囲に換算し直した。

破面欠陥率  $\alpha_s$  は, 破面から計算した面積欠陥率である。通常は全破断面積に対する欠陥の占める割合で表示

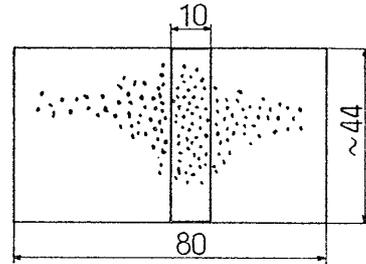


Fig. 4 Test area in fracture surface

することが多い。しかし, X 線欠陥率は欠陥が集中している箇所に対する局所的な表示であることから, ここでは Fig. 4 に示すように, 破断面内において最もブローホールが含まれる幅 10 mm の領域での計算値とし, (2) 式で算定した。すなわち, 局所的な破面欠陥率を表わす。

$$\alpha_s(\%) = 100 A_{SB} / A_S \quad (2)$$

ここで,

$A_{SB}$ : 破断面検査視野内のブローホールの占める断面積

$A_S$ : 破断面中の検査視野面積 (この場合 10 mm×板厚)

応力範囲  $S_R$  と破断寿命  $N_f$  の関係を Fig. 5 に示す。図中の曲線 ④ および ⑤ は, それぞれ  $\alpha_s=0$  に対応するものである。すなわち, as welded 継手および dressed 継手の 50% 破壊確率の応力範囲と破断寿命との関係を示したものである。また代表的な as welded 継手試験片ならびに dressed 継手試験片の破断面状況を Photo. 1 に示す。

破断面にブローホールを含まない試験片の破断寿命

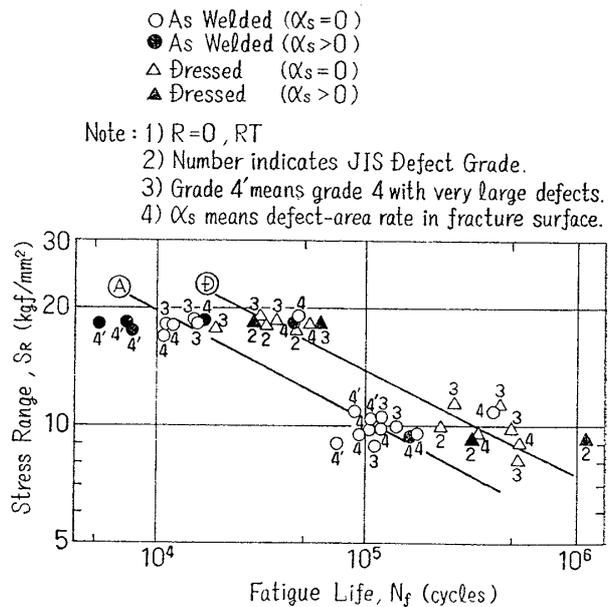


Fig. 5 Stress range versus fatigue life ( $S_R$  versus  $N_f$ )

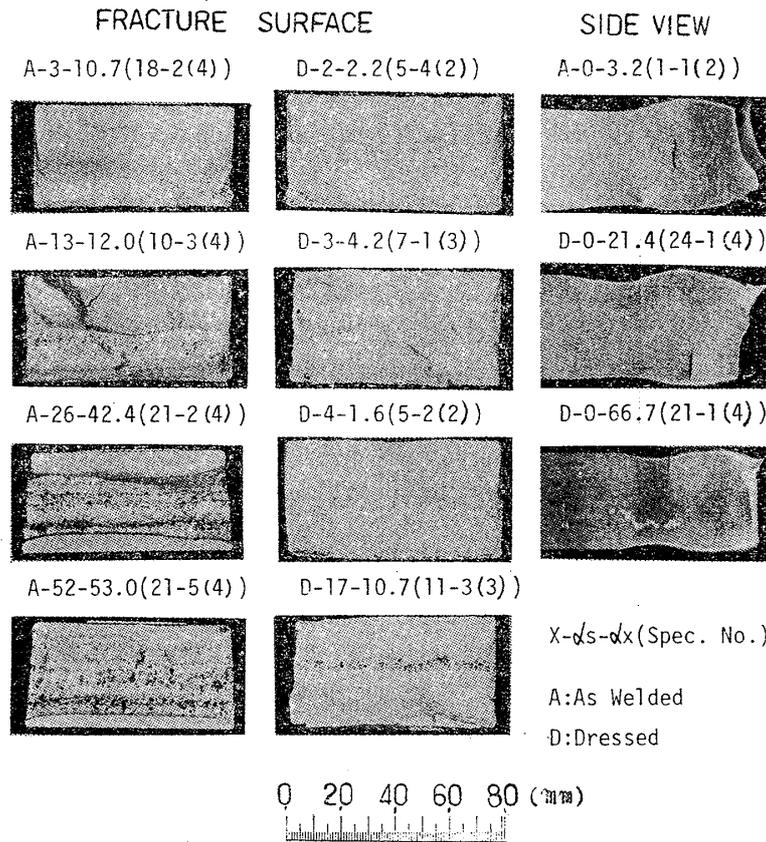
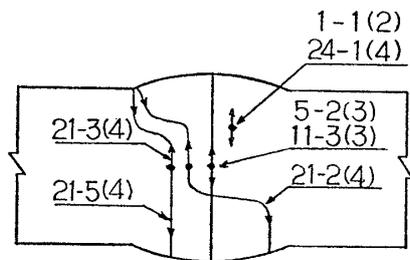


Photo. 1 Fracture appearance of butt welded joints with blow holes

は、それを含む試験片の破断寿命よりも常に大きくなる  
とは限らないようである。また、破断面にブローホール  
を含まない試験片でも Table 4 ならびに Table 5 に示  
す程度のブローホールが X 線検査で検知されており、こ  
のことからブローホールの含有率が小さいと破断寿命減  
少にはあまり効かないことがわかる。したがって、逆に  
余盛形状その他の影響を含めて材料強度のばらつきが非  
常に大きいといえる。もちろんブローホールの含有率な  
らびにその寸法が非常に大きくなると、破断寿命は明瞭  
に低下する。特に JIS 欠陥等級 4 以下のブローホールを  
有する as welded 継手は、破断寿命の低下が著しい。

破断面にブローホールを含む試験片の破断様式は、



Note: A-B(C) indicates specimen number.  
A: Plate No., B: Piece No.,  
C: JIS Defect Grade

Fig. 6 Fracture path

Fig. 6 に示すようにさまざまである。また、Photo. 1 に示すように、破断面にブローホールを含まずに溶接止端部から破断した試験片でも、継手試験片側面からみるとブローホールから亀裂が成長しているものもある。

#### 4 考 察

##### 4.1 X 線欠陥率と局部的破面欠陥率の関係

X 線欠陥率  $\alpha_x$  と局部的破面欠陥率  $\alpha_s$  との関係を Fig. 7 に示す。同図には、板厚 10~50 mm の鉄鋼突合せ継手結果 (ブローホール)<sup>5),15)</sup> についても参考のためにプロットした。ブローホールは、第 2 種欠陥に比べて両者の対応が悪いといわれているが、本試験片によれば、破面全面にブローホールが一様分布している試験片の方が  $\alpha_x$  と  $\alpha_s$  との対応がよい。本試験結果を含めて全データのほぼ 80% が  $0.5 \leq \alpha_s / \alpha_x \leq 2$  の範囲内に入っている。なお、本試験結果はほぼ  $\alpha_s / \alpha_x = 1$  の線に沿って分布しているのに対し、鉄鋼の場合は  $\alpha_x$  の小さい範囲

で若干傾向を異にしている。これは、欠陥率の算定法の差異によるものと思われる。

##### 4.2 母材ならびに各種仕上げの突合せ継手の疲労強度比較

Fig. 8 に、本試験結果 (㊸ および ㊹) を含めて、Al

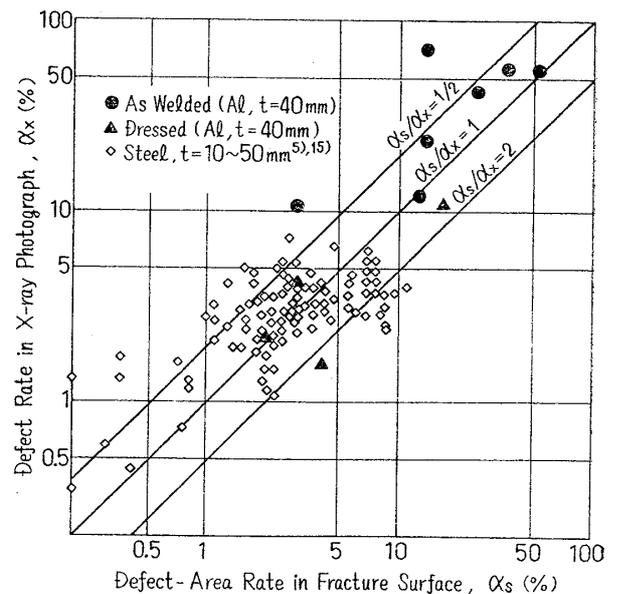


Fig. 7 Defect rate in X-ray photograph versus defect-area rate in fracture surface ( $\alpha_x$  versus  $\alpha_s$ )

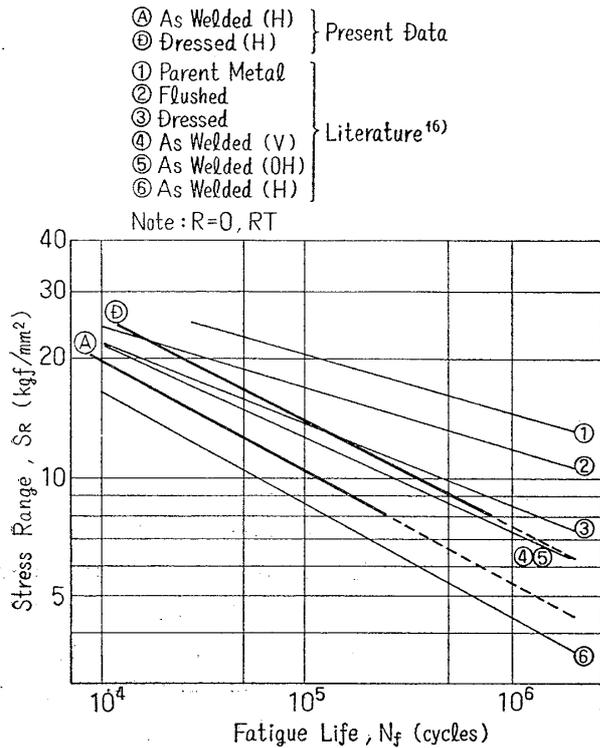


Fig. 8 S-N curves for A 5083-0 aluminum parent metal and butt welded joints ( $P=50\%$ ,  $\alpha_S=0$ )

合金 A 5083-0 材の母材ならびに各種仕上げ突合せ溶接継手の応力範囲と破断寿命 (破壊確率  $P=50\%$ ) との関係を示す<sup>16)</sup>。

- (A) as welded (H)  $S_R=256.1N_f^{-0.278}$  (3)
- (D) dressed (H)  $S_R=284.6N_f^{-0.262}$  (4)
- (1) 母材<sup>16)</sup>  $S_R=107.6N_f^{-0.144}$  (5)
- (2) flushed<sup>16)</sup>  $S_R=100.3N_f^{-0.154}$  (6)
- (3) dressed<sup>16)</sup>  $S_R=150.3N_f^{-0.208}$  (7)
- (4)(5) as welded (V, OH)<sup>16)</sup>  $S_R=184.1N_f^{-0.234}$  (8)
- (6) as welded (H)<sup>16)</sup>  $S_R=209.4N_f^{-0.280}$  (9)

ここで、

dressed 条件：溶接止端部半径を 4~10mm としたグラインダー仕上げ

flushed 条件：母材平行表層部を含めた機械的平滑仕上げによる完全余盛削除(角変形なし)

本試験結果の as welded 継手 (Fig. 8 中の (A)) は、当社で過去に実施した横向き継手 (Fig. 8 中の (6)) に比べると若干大きくなっている。また、dressed 継手 (Fig. 8 中の (D)) は (3) とあまり差はないが、勾配が多少異なっている。as welded の縦向き溶接継手 (4) または上向き溶接継手 (5) は、余盛形状が良好なために dressed 継手と疲労強度において大差がない。したがって、横向き継手でも溶接金属の垂れ下がりやを少なくして余盛形状をよくすれば、疲労強度の向上が望めると考えられる。

### 4.3 許容欠陥率と JIS 欠陥等級との対応

許容欠陥率の決め方は、通常、無欠陥の as welded 継手と同等の疲労強度を有する欠陥溶接継手の  $\alpha_S$  を、その溶接継手に対する許容限界欠陥率とする方法がとられている。すなわち、余盛による疲労強度低下率よりも、欠陥による疲労強度低下率の方が小さい場合を許容している。

しかし、この方法では、as welded 継手に対しては許容欠陥率が定められない。そこでまず、as welded 継手ならびに dressed 継手の疲労強度が、局部的破面欠陥率の増大に伴ってどのように減少するのかを検討することにした。高サイクル域での S-N 線図の勾配は、無欠陥継手と欠陥継手では異なること、また何れの継手でも疲労強度のばらつきは大きいこと、さらに非破壊検査における  $\alpha_X$  と  $\alpha_S$  との対応が完全ではないが、ほぼ  $\alpha_S/\alpha_X \leq 1$  であることなどを考慮して、1) 破断寿命： $N_f=2 \times 10^6$  cycles, 2) 破壊確率： $P=50\%$ , 3)  $\alpha_S/\alpha_X=1$  として評価することにした。

ところで、日本造船研究協会 SR 32 部会では、 $N_f=2 \times 10^6$  cycles の flushed 継手の疲労強度係数  $K$  の評価式として、(10) 式を提案している<sup>3)</sup>。誤差は  $\pm 15\%$  である (Fig. 9 参照)。

$$K=90-40 \log \alpha_S \quad (10)$$

ここで、

$$K = \frac{\text{欠陥を有する flushed 継手の } N_f=2 \times 10^6 \text{ cycles での疲労強度}}{\text{無欠陥 flushed 継手の } N_f=2 \times 10^6 \text{ cycles での疲労強度}} \times 100(\%)$$

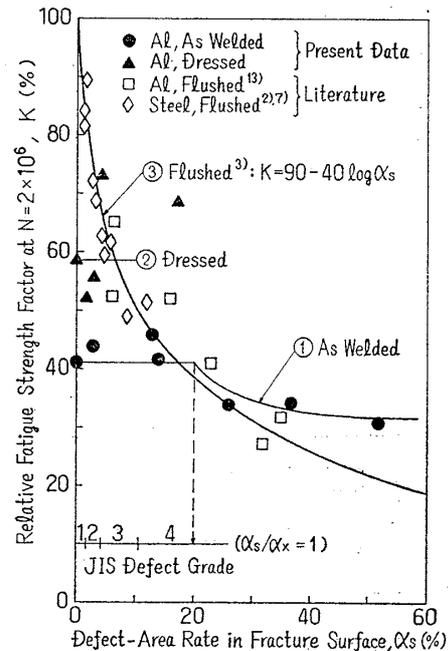


Fig. 9 Fatigue strength factor versus defect-area rate in fracture surface ( $K$  versus  $\alpha_S$ )

$\alpha_S$  : 破面欠陥率 (%)

(10) 式は鉄鋼材料に対して求められたものであるが<sup>2),3),7)</sup>, Fig. 9 に示すように, Al 材料にも十分適用できるものである<sup>13)</sup>。

そこで, 本試験片と同種材料の flushed 継手 (Fig. 8 中の ②) ならびに (6) 式参照) に対する as welded 継手ならびに dressed 継手 (Fig. 8 中の ④) ならびに ⑤) の,  $N_f=2 \times 10^6$  cycles における相対疲労強度 (以下, この比を相対疲労強度係数  $K$  と称する) を下記の方法で求めた。

まず, 溶接継手  $X$  の疲労強度は,  $N_f$  の関数と  $\alpha_S$  の関数の積として表示できると仮定した。

$$S_{R,X}(N_f, \alpha_S) = S_{R,X}(N_f, 0) \cdot f_X(\alpha_S) \quad (11)$$

ここで,  $f_X(\alpha_S)$  は  $\alpha_S$  の関数で, 材料定数である。すなわち,  $\alpha_S$  の影響は  $N_f$  に依存しないと仮定した。

さらに, 無欠陥 flushed 継手の  $N=N_f$  での疲労強度  $S_{R,F}(N_f, 0)$  で (11) 式の両辺を除すと, (12) 式を得る。

$$\begin{aligned} S_{R,X}(N_f, \alpha_S) / S_{R,F}(N_f, 0) \\ = f_X(\alpha_S) \cdot S_{R,X}(N_f, 0) / S_{R,F}(N_f, 0) \quad (12) \end{aligned}$$

(12) 式の  $f_X(\alpha_S)$  が  $N_f$  に依存しないことから,  $N_f=2 \times 10^6$  cycles における溶接継手  $X$  の相対疲労強度係数  $K$  は (13) 式のように推定できる。

$$\begin{aligned} K = S_{R,X}(2 \times 10^6, \alpha_S) / S_{R,F}(2 \times 10^6, 0) \\ = f_X(\alpha_S) \cdot S_{R,X}(2 \times 10^6, 0) / S_{R,F}(2 \times 10^6, 0) \quad (13) \end{aligned}$$

ただし,  $f_X(\alpha_S)$  はできるだけ  $N_f$  が  $2 \times 10^6$  cycles に近いデータを用いるのが望ましい。

このようにして求めた  $N_f=2 \times 10^6$  cycles における各種仕上げの突合せ溶接継手の相対疲労強度係数  $K$  と破面欠陥率  $\alpha_S$  との関係を図 9 に示す。なお, 破面欠陥率  $\alpha_S$  は局部的破面欠陥率である。Fig. 9 からわかるように flushed 継手の場合には, 破面欠陥率の増大に伴い急激に疲労強度は低下する。一方, as welded 継手の場合には, 無欠陥でも余盛による応力集中のため疲労強度は低下するが, 局部的破面欠陥率が増大しても急激な疲労強度の低下は生じない。また, dressed 継手は両者の中間的傾向を示している。この理由は, flushed などにすれば構造的応力集中は緩和されるが, 欠陥部が板表面に生じる可能性があり, 内部欠陥よりも厳しくなるためと思われる。一方, as welded 継手の場合はすべて内部欠陥のため, その効きは相対的に小さいものと思われる。

一般には, as welded 継手よりも dressed 継手や flushed 継手の方が疲労強度上好ましいと考えられているが, それは破面欠陥率が小さい場合のことであり, 破面欠陥率が大きくなれば, 逆の傾向が現われることがわかった。

Fig. 9 に示すように, データ不足のために十分な定量

的考察は難しい。しかしながら,  $\alpha_S=0$  のデータは平均値を 1 点で表示し,  $\alpha_S \neq 0$  のデータは一つ一つの実験点を示していることから,  $\alpha_S=0$  のデータに重みをもたせて平均的なカーブを引いた。無欠陥継手の疲労強度以下となる限界の破面欠陥率は, データ不足のため確定が難しい。dressed 継手の場合は, 10% 程度と推定される。また, as welded 継手の場合には, 20% 程度と考えられる。したがって, as welded 継手の許容できる局部的破面欠陥率は, 約 20% 程度であると考えてよいであろう。

なお, ここでの破面欠陥率は, 全破断面中の欠陥の占める割合ではなく, (2) 式で定義したように欠陥が集中している部分での欠陥の占める割合である。したがって, 全破断面に対する破面欠陥率よりも大きめに推定されている。

また,  $\alpha_X$  と  $\alpha_S$  との関係 (Fig. 7) ならびに  $\alpha_X$  と JIS 欠陥等級との関係 (Fig. 3) を用いて, これら許容破面欠陥率に対応する JIS 欠陥等級を求めると, Fig. 9 中に示すようになる。すなわち,  $\alpha_S/\alpha_X=1$  とすると, as welded 継手の許容破面欠陥率は JIS 欠陥等級の 4 級に相当することがわかる。したがって, as welded 継手に対しては, 少なくとも JIS 欠陥等級の 3 級程度は許容できると考えられる。

なお, 応力分布を考慮に入れて許容欠陥を決定する必要がある場合には, 疲労被害度を媒介にした矢島, 川野ら<sup>17)</sup>の方法が良いと思われるが, ここではふれなかった。

## 5 ま と め

LNG タンク用 Al 合金 (A 5083-0) のブローホールを有する as welded ならびに dressed の突合せ溶接継手試験片を製作し, X線検査ならびに軸力片振り引張り疲労試験を実施し, 下記の知見が得られた。

- 1) JIS : Z 3105-1977 の各欠陥等級に対応する X 線欠陥率は互いに重複することなく, かつ X 線欠陥率の全領域を包含する。その意味で両者の対応がよい。
- 2) X 線欠陥率  $\alpha_X$  と局部的破面欠陥率  $\alpha_S$  とは, 比較的よい対応にあることが明らかとなった。全データの約 80% が  $0.5 \leq \alpha_S/\alpha_X \leq 2$  の範囲に包含されている。特に, ブローホールが破断面上に一様に分布しているときは,  $\alpha_X$  と  $\alpha_S$  の対応がさらによい。
- 3)  $N=2 \times 10^6$  cycles における各種仕上げの突合せ溶接継手の, 無欠陥 flushed 継手の疲労強度に対する相対疲労強度係数  $K$  と局部的破面欠陥率  $\alpha_S$  の関係を求めたところ, ブローホールに対する感受性は, flushed 継手, dressed 継手, as welded 継手になるにつれ鈍くなることが明らかとなった。
- 4) as welded 継手の許容できる局部的破面欠陥率

は、約 20% 程度となることがわかった。また、これに対応する JIS 欠陥等級は 4 級である。したがって、as welded 継手に対しては、少なくとも JIS 欠陥等級の 3 級程度は許容できると考えられる。なお、さらに詳細評価を行うためには、今後実験データの補充が必要である。

終りに、本研究遂行に当り、種々御指導いただいた東京大学 飯田國廣教授に厚く御礼申し上げます。また、種々御支援いただいた三菱重工業(株)長崎造船所造船総括部主管 永元隆一博士に深く謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 永元隆一, 黒川正文, 大黒 貴, 岩本啓一: LNGC 球形タンクの非破壊検査について, 西部造船会々報, 第 64 号掲載予定 (昭和 57 年秋季講演会にて発表の予定).
- 2) Burdekin, F. M., Harrison, J. D. and Young, J. G.: The effect of weld defects with special reference to BWRA research, IIW Doc. No. XIII-506-68.
- 3) 服部一郎: 構造物の溶接部に生じる欠陥とその評価, 溶接学会誌, Vol. 34, No. 7 (1965), pp. 641~653.
- 4) 石井勇五郎, 他: 放射線試験による溶接部の強度を考慮した等級分類 (低炭素鋼) NDIS 1501-67, 非破壊検査, Vol. 16, No. 4 (1967), pp. 170~177.
- 5) Ishii, Y., Kihara, H. and Tada, Y.: On the Relation between the Nondestructive Testing Information of Steel Welds and their Mechanical Strength, 非破壊検査, Vol. 16, No. 8 (1967), pp. 319~343.
- 6) 石井勇五郎: 鋼材溶接部の非破壊検査像と機械的強度の関係, 高圧力, Vol. 6, No. 3 (1968), pp. 1304~1310.
- 7) 石井勇五郎, 飯田國廣: 圧力容器の溶接欠陥と強度の問題, 高圧ガス, Vol. 7, No. 1 (1970), pp. 511~525.
- 8) Harrison, J. D.: The Basis for a Proposed Acceptance Standard for Weld Defects Part 1: Porosity, IIW Doc. No. XIII-624-71.
- 9) 石井勇五郎: 非破壊検査上からの破壊に対する対策, 高圧力, Vol. 9, No. 5 (1971), pp. 2494~2508.
- 10) 飯田國廣: 溶接欠陥が疲労強度に及ぼす影響, 非破壊検査, Vol. 22, No. 8 (1973), pp. 457~466.
- 11) 石井勇五郎: 破壊試験結果からみた溶接部の欠陥度算定範囲, 非破壊検査, Vol. 22, No. 8 (1973), pp. 479~490.
- 12) Lawrence, F. V. Jr, Munse, W. H. and Burk, J. D.: Effects of Porosity on the Fatigue Properties of 5033 Aluminum Alloy Weldments, WRC Bulletin No. 206 (1975. 6).
- 13) 佐藤四郎, 松本二郎, 大越 登: 5083合金の突合せ溶接継手のブローホールが疲れ強さに及ぼす影響, 軽金属 (1976), pp. 398~405.
- 14) JIS: Z 3105-1977: アルミニウム溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法, 日本工業標準調査会審議, 日本規格協会発行.
- 15) 石井勇五郎, 富士 岳: Conformity of Internal Weld Defects between Non-destructive Testing and Visual Inspection, IIW Doc. No. V-411-69.
- 16) 社内資料: アルミニウム合金 A 5083-0 材の母材および溶接継手部の疲労亀裂発生特性 (公表予定).
- 17) 矢島 浩, 川野 始, 他: 溶接欠陥許容値決定法に関する一考察, 日本造船学会論文集, Vol. 141 (1977. 6).