

製造と工事を支える技術と設備の紹介
株式会社名村造船所

冷間曲げ加工時におけるプラズマ切断面上の 延性破壊に影響を及ぼす支配的要因

高橋 一成*

Kazunari Takahashi



日本貴 秀一**

Shuichi Yamatoki



滑川 哲也***

Tetsuya Namegawa



木下 昌彦****

Masahiko Kinoshita



藤岡 政昭***

Masaaki Fujioka



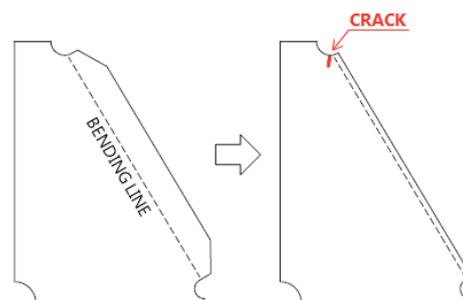
一般的に、高張力鋼よりも軟鋼の方が延性破壊が生じにくいとされるが、船殻部材の一つであるフランジブラケットを冷間曲げ加工で製作する際に稀に生じる微小き裂に対しては、軟鋼部材において高張力鋼よりもき裂が長くなる場合が確認された。フランジブラケット製作のプロセスにはき裂に対する多くの影響因子が存在すると考えられ、そのすべてに対処するのは現実的ではないため、支配的要因を特定し効果的な対策を講じる必要がある。

本研究では、冷間曲げ加工時に発生するき裂に対して、非線形 FE 解析と様々な条件下での曲げ試験、破面観察を実施し、き裂は延性破壊であること、引張ひずみが最大となる位置で延性破壊が生じていること、ひずみと母材延性だけではき裂の挙動を管理できないことを確認した。そこで、プラズマ切断面の硬さ試験を実施し、条件によっては高張力鋼よりも軟鋼の方が硬化することを確認した。これらの結果から、ひずみと母材延性、切断面硬さがき裂の支配的要因であると特定し、これらの3つの影響を考慮した延性破壊パラメータを提案した。さらに、鋼板内の介在物の存在も支配的要因の1つである可能性を示唆した。

1. 緒言

フランジブラケットの冷間曲げ加工直後に、第1図のような微小き裂が生じることがある。造船業界の経験的知見から、このき裂は延性破壊であるとされているが、板厚や母材延性等の条件が同じような部材において一律に亀裂が発生するわけではなく、き裂の要因を特定できない状態であった。一方、冷間曲げ加工は造船において多用される工法の一つで、例えばVLCC（超大型油槽船）1隻で4,000個以上のフランジブラケットに利用されているため、き裂が生じた場合の後戻り作業によるコスト増加の影響は大きい。また、フランジブラケットなどの船殻部材の板厚は、CSR¹⁾の適応や船舶の大型化等により増厚傾向にあり、き裂発生を助長する条件へと変化している。品質管理やコスト削減の観点から、き裂発生という現象を精査し、対策を検討する必要があった。

これらのき裂の要因を調査するために、FE解析、曲げ試験、破面観察、硬さ試験、粗さ測定を、写真1、第2図に示すプレス機、試験片を使用して実施した。第3図にはプレス機と試験片の位置関係を示す。第4図にはグラインダによるエッジ処理の位置を示す。また、曲げ試験で発生したき裂の長さを d と定義し（第5図）、分析に利用した。



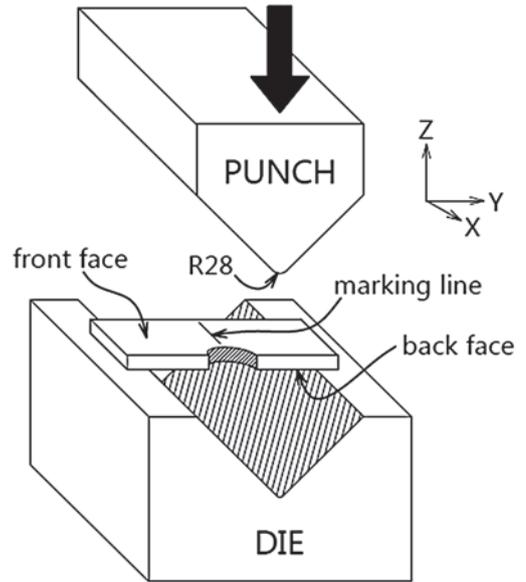
第1図 曲げ後に生じる微小き裂の位置

原稿受理日：July 27, 2018

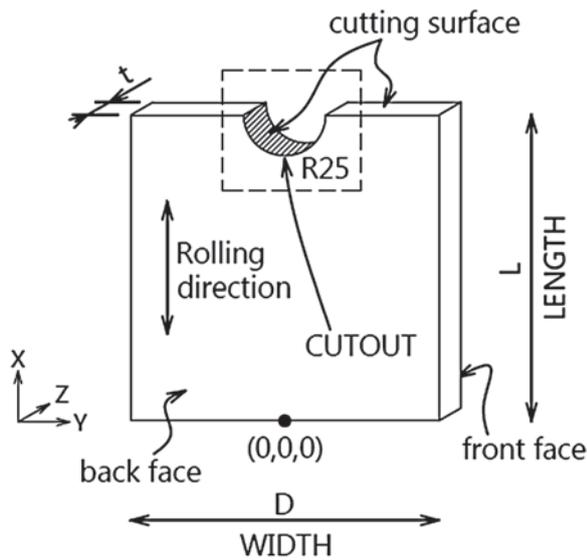
*株式会社名村造船所 船舶海洋事業部 設計本部 船殻設計部 船殻生産設計課
**株式会社名村造船所 船舶海洋事業部 設計本部 船殻設計部 船殻設計課



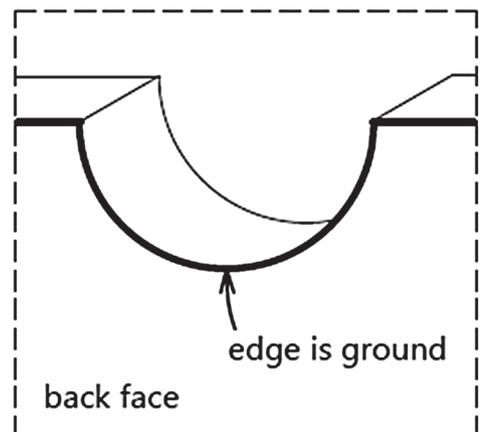
写真1 弊社1,000t プレス機



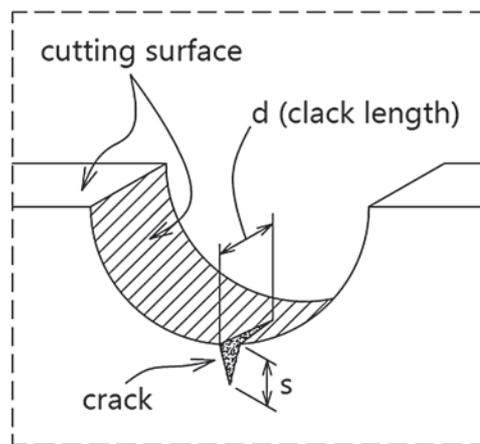
第3図 試験片及びプレス機の座標系



第2図 試験片の形状及び座標系



第4図 グラインダによるエッジ処理の位置



第5図 き裂長さの定義

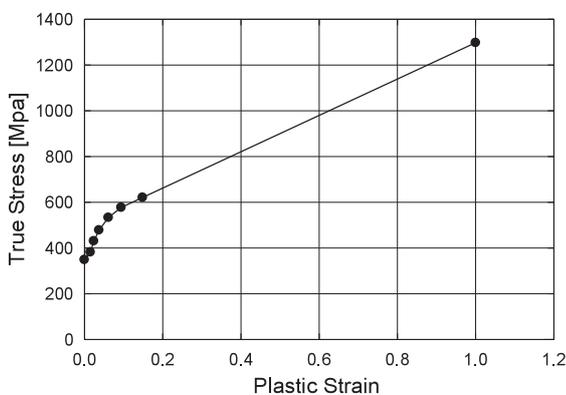
2. 非線形有限要素解析

曲げ加工後のひずみを確認するためにFE解析を行った。モデルサイズは第1表に示す。解析に用いた要素の種類は、8節点6面体要素で、最小要素サイズは、 $0.6\text{mm} \times 0.6\text{mm} \times 0.6\text{mm}$ である。解析にはMSC Marc 2013²⁾を使用した。境界条件は、DIE:6自由度固定、PUNCH:Z方向のみ自由、試験片:6自由度フリーで、PUNCHまたはDIEと接触している。摩擦係数は0.3、ヤング率は206GPa、ポアソン比は0.3である。降伏点後の応力-ひずみ曲線を第6図に示す。最小要素は第7図に示すように試験片の半円部分に放射線状に設けた。

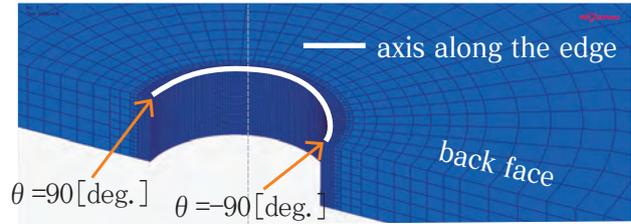
第8図に示す相当塑性ひずみのコンター図では、半円の最深部で最も大きいひずみを示した。また、front face ($Z = t$) 及び back face ($Z = 0$) の面のエッジにおけるひずみが最も高かった。front face は圧縮ひずみ、back face は引張ひずみを示した。したがって、き裂はback faceのエッジ付近で発生すると推測される。さらに、第2表に示すように、試験片の板厚が増加するにつれてひずみが増加することも確認された。

第1表 FEモデルのサイズ

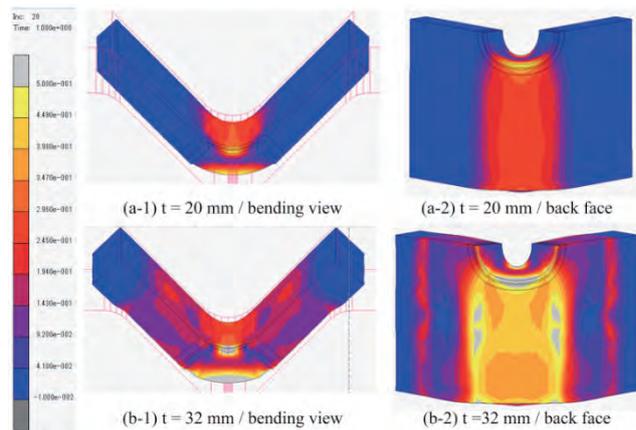
| t | L | D |
|------|------|------|
| [mm] | [mm] | [mm] |
| 15.0 | 150 | 250 |
| 20.0 | 150 | 250 |
| 25.0 | 150 | 250 |
| 32.0 | 150 | 250 |



第6図 真応力-ひずみ線図



第7図 半円部のメッシュの状態



第8図 相当塑性ひずみコンター図

第2表 各板厚での主ひずみ ($\theta=0[\text{deg.}]$)

| t | Principal Strain |
|------|------------------|
| [mm] | |
| 15.0 | 0.40 |
| 20.0 | 0.50 |
| 25.0 | 0.58 |
| 32.0 | 0.68 |

3. 曲げ試験

3.1 試験条件

試験片の形状は第2図に示す形状で、第1図に示す実船のブラケット形状よりも半円部のひずみが大きい。これにより、実船の冷間曲げ加工よりもき裂が生じやすく、き裂長さを利用した分析を容易にしている。試験片はプラズマ切断によって切り出され、プラズマアークは front face から back face に向かって放出される。エッジ処理の加工条件では、第4図のようにグラインダ加工を施した。

プレス機と試験片の位置関係は第3図に示され、PUNCHは下へ移動し、front faceと接触した後、試験片がDIEの斜面に接触する。したがって曲げ後の試験片はV字となる。

試験を通して同じ条件を維持するため、PUNCH と DIE は一貫して同一のものを使用し、プレス荷重は統一した。すなわち、曲げ半径と曲げ角度がすべての試験片で同一であるため、ひずみの差は主に試験片の板厚の差によってもたらされる。

曲げ試験には 59 個の試験片を用意し、それらの特性は第 3 表、第 4 表、第 5 表に示す。試験片の板厚は t で示される。各表中の降伏応力は鋼材規格の要求値であり、引張試験の結果ではない。すなわち、降伏応力 235MPa は軟鋼相当 (MS)、355MPa 及び 390MPa は高張力鋼相当 (HT) である。 C_{eq} 及び P_{cm} ³⁾ は各鋼板のミルシートに示される化学成分に基づく溶接性や熱影響による硬化の指標であり、それらの定義は式 (1) 及び式 (2) に示す。鋼板については、すべて同一の製鉄メーカーにて製造されたものを使用し、第 2 図の X 軸と試験片の圧延方向が平行となるように配置して切り出した。

第 3 表 試験片の諸元 (軟鋼相当, MS/235MPa)

| No. | Name of piece | t [mm] | elongation [%] | yield stress (*1) [Mpa] | Chemical composition [%] | | | | Edge grinding |
|-----|---------------|--------|----------------|-------------------------|--------------------------|---------------|---------------|----------|---------------|
| | | | | | C x100 | C_{eq} x100 | P_{cm} x100 | Mn5 x100 | |
| 1 | NS4-M120-3 | 12.2 | 31 | 235 | 18 | 29.7 | 21.8 | 325.0 | NONE |
| 2 | NS4-M120-2 | 12.2 | 31 | 235 | 18 | 29.7 | 21.8 | 325.0 | NONE |
| 3 | NS4-M120-1 | 12.3 | 31 | 235 | 18 | 29.7 | 21.8 | 325.0 | NONE |
| 4 | A-2 | 14.2 | 33 | 235 | 18 | 29.3 | 21.5 | 264.0 | NONE |
| 5 | A-1 | 14.2 | 33 | 235 | 18 | 29.3 | 21.5 | 264.0 | NONE |
| 6 | B25-K150S-2 | 15.1 | 30 | 235 | 19 | 29.3 | 22.2 | 240.0 | NONE |
| 7 | B25-K150S-1 | 15.1 | 30 | 235 | 19 | 29.3 | 22.2 | 240.0 | NONE |
| 8 | A-3 | 15.3 | 30 | 235 | 18 | 28.3 | 21.3 | 360.0 | NONE |
| 9 | A-4 | 15.3 | 30 | 235 | 18 | 28.3 | 21.3 | 360.0 | NONE |
| 10 | A-6 | 16.4 | 28 | 235 | 19 | 30.0 | 22.5 | 448.0 | NONE |
| 11 | A-5 | 16.4 | 28 | 235 | 19 | 30.0 | 22.5 | 448.0 | NONE |
| 12 | B25-K170S-2 | 17.2 | 33 | 235 | 12 | 33.0 | 18.8 | 472.0 | NONE |
| 13 | B25-K170S-1 | 17.3 | 33 | 235 | 12 | 33.0 | 18.8 | 472.0 | NONE |
| 14 | B-2 | 17.8 | 32 | 235 | 11 | 32.6 | 18.0 | 488.0 | YES |
| 15 | B-1 | 17.8 | 32 | 235 | 11 | 32.6 | 18.0 | 488.0 | YES |
| 16 | A-7 | 18.1 | 30 | 235 | 17 | 31.9 | 21.9 | 567.0 | NONE |
| 17 | A-8 | 18.2 | 30 | 235 | 17 | 31.9 | 21.9 | 567.0 | NONE |
| 18 | A-9 | 19.3 | 30 | 235 | 11 | 30.2 | 17.3 | 530.0 | YES |
| 19 | B25-K200S-1 | 20.2 | 33 | 235 | 14 | 30.9 | 19.5 | 480.0 | NONE |
| 20 | B25-K200S-2 | 20.2 | 33 | 235 | 14 | 30.9 | 19.5 | 480.0 | NONE |
| 21 | B-3 | 20.4 | 29 | 235 | 14 | 30.9 | 19.5 | 465.0 | YES |
| 22 | B-4 | 20.4 | 29 | 235 | 14 | 30.9 | 19.5 | 465.0 | YES |
| 23 | B-6 | 23.3 | 31 | 235 | 19 | 31.7 | 23.1 | 438.0 | YES |
| 24 | B-5 | 23.4 | 31 | 235 | 19 | 31.7 | 23.1 | 438.0 | YES |
| 25 | B-7 | 25.3 | 30 | 235 | 19 | 31.7 | 23.1 | 438.0 | YES |
| 26 | B-8 | 25.3 | 30 | 235 | 19 | 31.7 | 23.1 | 438.0 | YES |

第 4 表 試験片の諸元 (高張力鋼相当, HT/355MPa)

| No. | Name of piece | t [mm] | elongation [%] | yield stress (*1) [Mpa] | Chemical composition [%] | | | | Edge grinding |
|-----|---------------|--------|----------------|-------------------------|--------------------------|---------------|---------------|----------|---------------|
| | | | | | C x100 | C_{eq} x100 | P_{cm} x100 | Mn5 x100 | |
| 27 | B-6K-11 | 15.1 | 25 | 355 | 16 | 33.8 | 21.8 | 490.0 | YES |
| 28 | A-6K-13 | 15.2 | 25 | 355 | 16 | 33.8 | 21.8 | 490.0 | NONE |
| 29 | B-6K-12 | 15.2 | 25 | 355 | 16 | 33.8 | 21.8 | 490.0 | YES |
| 30 | A-6K-14 | 15.3 | 25 | 355 | 16 | 33.8 | 21.8 | 490.0 | NONE |
| 31 | B25-H160S-3 | 16.2 | 20 | 355 | 16 | 35.6 | 22.4 | 550.0 | NONE |
| 32 | B25-H160S-2 | 16.2 | 20 | 355 | 16 | 35.6 | 22.4 | 550.0 | NONE |
| 33 | B25-H160S-1 | 16.3 | 20 | 355 | 16 | 35.6 | 22.4 | 550.0 | NONE |
| 34 | A-6K-16 | 16.7 | 25 | 355 | 16 | 33.8 | 21.9 | 396.0 | NONE |
| 35 | A-6K-15 | 16.8 | 25 | 355 | 16 | 33.8 | 21.9 | 396.0 | NONE |
| 36 | A-6K-19 | 18.3 | 25 | 355 | 16 | 34.0 | 22.0 | 495.0 | NONE |
| 37 | A-6K-20 | 18.3 | 25 | 355 | 16 | 34.0 | 22.0 | 495.0 | NONE |
| 38 | B-6K-15 | 20.1 | 24 | 355 | 16 | 33.5 | 21.8 | 686.0 | YES |
| 39 | A-6K-24 | 20.1 | 24 | 355 | 16 | 33.5 | 21.8 | 686.0 | NONE |
| 40 | A-6K-23 | 20.2 | 24 | 355 | 16 | 33.5 | 21.8 | 686.0 | NONE |
| 41 | B-6K-16 | 20.2 | 24 | 355 | 16 | 33.5 | 21.8 | 686.0 | YES |
| 42 | B-6K-17 | 23.1 | 26 | 355 | 16 | 34.0 | 22.0 | 594.0 | YES |
| 43 | B-6K-18 | 23.1 | 26 | 355 | 16 | 34.0 | 22.0 | 594.0 | YES |

第 5 表 試験片の諸元 (高張力鋼相当, HT/390MPa)

| No. | Name of piece | t [mm] | elongation [%] | yield stress (*1) [Mpa] | Chemical composition [%] | | | | Edge grinding |
|-----|---------------|--------|----------------|-------------------------|--------------------------|---------------|---------------|----------|---------------|
| | | | | | C x100 | C_{eq} x100 | P_{cm} x100 | Mn5 x100 | |
| 44 | A-0K-25 | 14.4 | 22 | 390 | 12 | 34.0 | 19.3 | 369.0 | NONE |
| 45 | B-0K-19 | 14.4 | 22 | 390 | 12 | 34.0 | 19.3 | 369.0 | YES |
| 46 | A-0K-26 | 14.5 | 22 | 390 | 12 | 34.0 | 19.3 | 369.0 | NONE |
| 47 | B-0K-20 | 14.5 | 22 | 390 | 12 | 34.0 | 19.3 | 369.0 | YES |
| 48 | B-0K-21 | 15.0 | 18 | 390 | 13 | 35.6 | 20.5 | 625.0 | YES |
| 49 | B-0K-22 | 15.0 | 18 | 390 | 13 | 35.6 | 20.5 | 625.0 | YES |
| 50 | A-0K-27 | 15.1 | 18 | 390 | 13 | 35.6 | 20.5 | 625.0 | NONE |
| 51 | A-0K-28 | 15.1 | 18 | 390 | 13 | 35.6 | 20.5 | 625.0 | NONE |
| 52 | B-0K-24 | 17.3 | 23 | 390 | 12 | 33.9 | 19.3 | 366.0 | YES |
| 53 | B-0K-23 | 17.3 | 23 | 390 | 12 | 33.9 | 19.3 | 366.0 | YES |
| 54 | NS4-H185-1 | 18.8 | 26 | 390 | 16 | 34.8 | 22.1 | 420.0 | NONE |
| 55 | NS4-H185-3 | 18.8 | 26 | 390 | 16 | 34.8 | 22.1 | 420.0 | NONE |
| 56 | NS4-H185-2 | 18.8 | 26 | 390 | 16 | 34.8 | 22.1 | 420.0 | NONE |
| 57 | NS4-H200-1 | 20.2 | 20 | 390 | 12 | 33.8 | 19.2 | 484.0 | NONE |
| 58 | NS4-H200-3 | 20.2 | 20 | 390 | 12 | 33.8 | 19.2 | 484.0 | NONE |
| 59 | NS4-H200-2 | 20.2 | 20 | 390 | 12 | 33.8 | 19.2 | 484.0 | NONE |

$$C_{eq} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}; \quad (1)$$

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2)$$

3. 2 曲げ試験の結果

曲げ試験後の試験片の例を写真 2 に示す。試験結果から、半円の切断面と back face の 2 面がなす交線上にき裂が生じていることが確認できる。試験結果を要約すると、第一に、FE 解析で最も大きい引張りひずみが示されたエッジ上に、実際のき裂も発生した。第二に、板厚が同等の軟鋼 (MS) と高張力鋼 (HT) で、軟鋼の方が長いき裂を示すケース (写真 3 (b), (d)) があつた。第三に、写真 3 (a) と (e) の比較では、よりひずみが大きい (e) においてき裂は生じておらず、グラインダによるエッジ処理の効果が確認された。ただし、よりひずみが大きい条件である (f), (h) ではグラインダ処理後でもき裂が生じている。

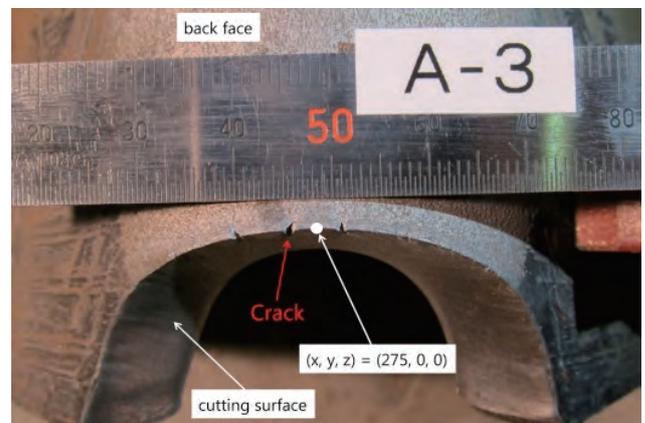


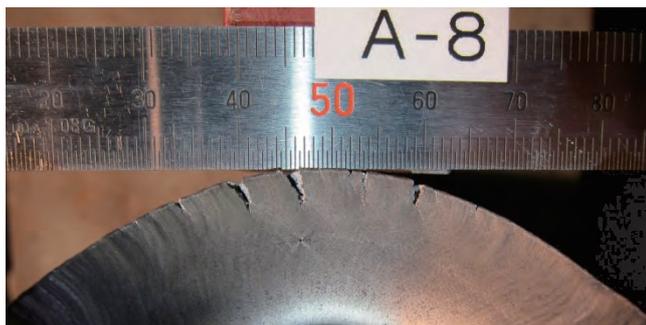
写真 2 曲げ試験後の試験片



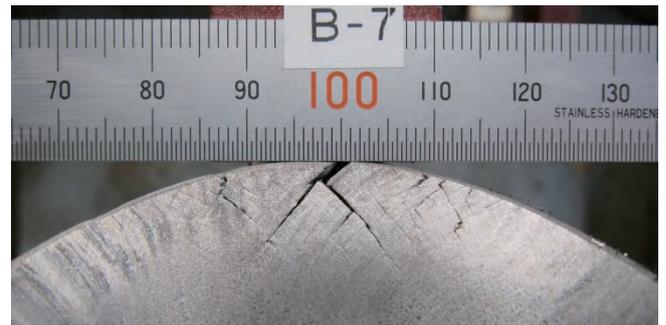
(a) Mild Steel / $t=15.3$ / Elongation=30



(e) Mild Steel with grinding / $t=17.8$ / Elongation=32



(b) Mild Steel / $t=18.2$ / Elongation=30



(f) Mild Steel with grinding / $t=25.3$ / Elongation=30



(c) High Tensile Steel / $t=14.5$ / Elongation=22



(g) High Tensile Steel with grinding / $t=20.1$ / Elongation=24



(d) High Tensile Steel / $t=18.3$ / Elongation=25



(h) High Tensile Steel with grinding / $t=23.1$ / Elongation=26

写真3 試験結果抜粋

3. 3 破面観察

き裂の破壊形態を特定するために、曲げ試験で得られた破面を観察した。軟鋼の破面観察には部材名 A-8 (No. 17) を使用し、高張力鋼には写真 4 の部材を使用した。なお、写真 4 の部材については、第 2 図に示した他の試験片とは外形が異なるが、同じ手順を経て曲げられている。それぞれの破面の画像は写真 5、写真 6 に示す。

これらの破面には、ポイドやディンプルといった特徴が見られた。これは延性破壊の特徴である。よって、曲げ試験におけるき裂は延性破壊であると断定した。

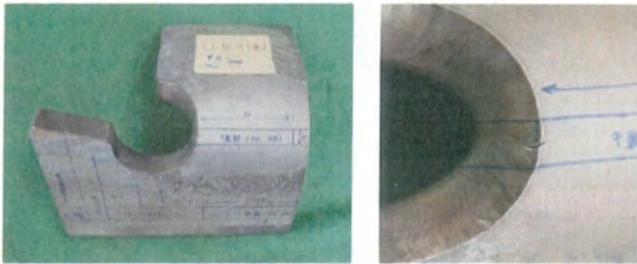
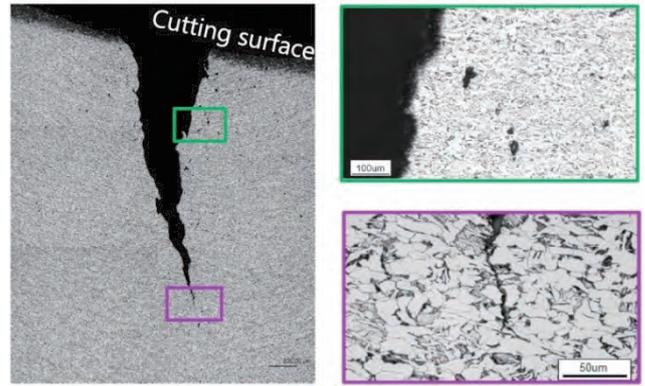
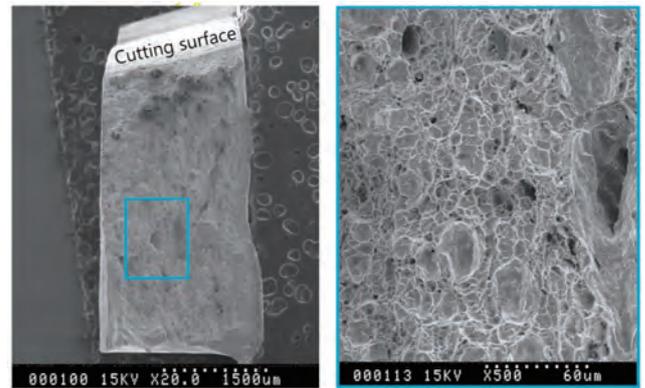


写真 4 破面観察用試験片 (高張力鋼)



(a) き裂とポイド



(b) 破面

写真 6 高張力鋼部材の破面観察

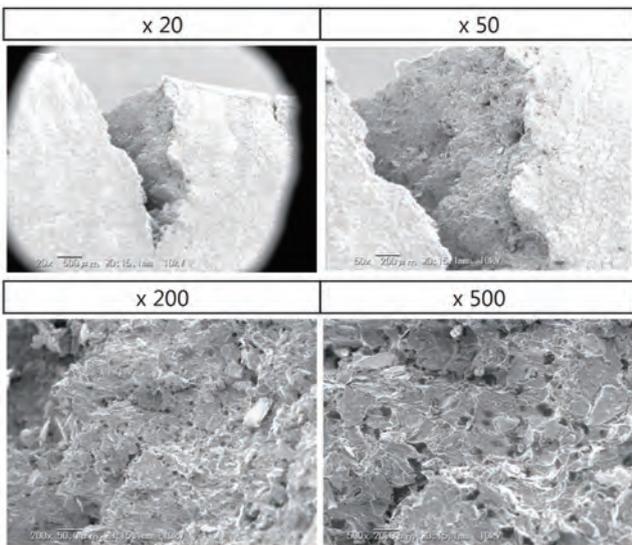


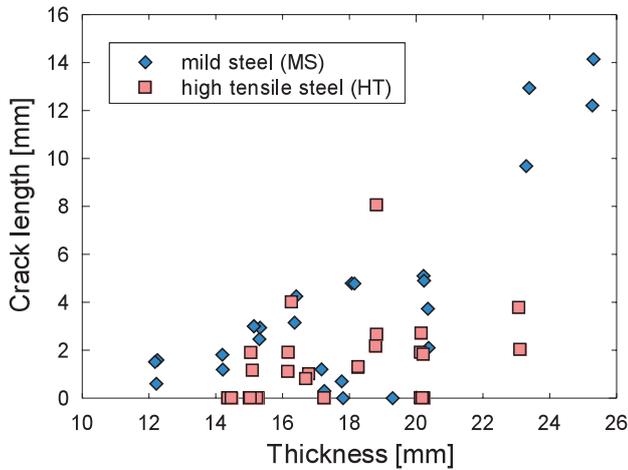
写真 5 軟鋼部材の破面観察

4. ひずみと母材延性の影響

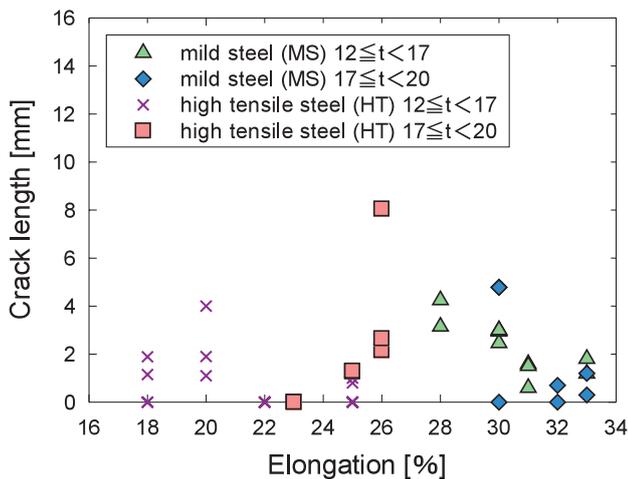
延性破壊は一般にひずみと母材延性が関係するとされるため、これらの因子とき裂長さの関係を調査した。前述したように、曲げ試験を通して同じ曲げ半径を維持していることから、試験片の板厚変化はひずみの変化に相当する。第 9 図は、き裂長さに対する板厚の影響を示す。通常、軟鋼は高張力鋼よりも延性に富み、板厚が同じ場合、母材の延性が良いほどき裂長さが減少することが予想されるが、第 9 図のデータでは、軟鋼 (MS) で高張力鋼 (HT) よりも長いき裂を有するケースが見られた。この結果は一般的な予想とは異なる。

第 10 図では、き裂長さに対する母材延性の影響を確認した。ここでは、データを 4 つの板厚グループに分け、さらに鋼材規格毎に分けている。つまり、1 つのグループ内における試験片のひずみは同程度である。横軸を母材延性 (ミルシート値) としているため、右下がりのグラフになることが予想されたが、そのような結果は示さなかった。これらの結果は、本研究で取り扱っている冷間曲げ加工時のプ

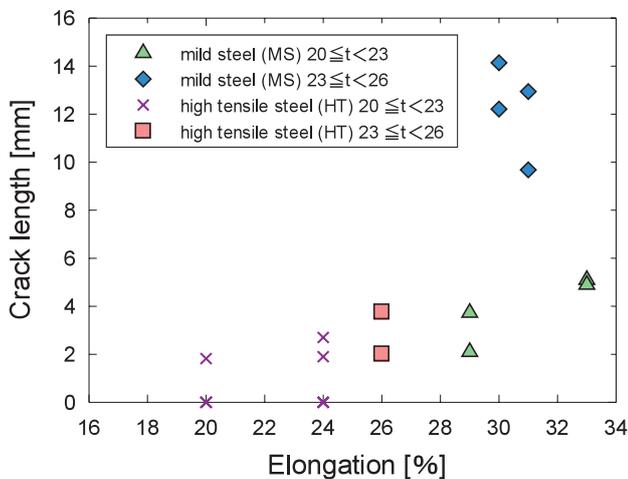
ラズマ切断面におけるき裂の長さが、ひずみと母材延性だけで制御されるものではないという事を示している。



第9図 板厚の影響



(a) $12 \leq t < 20$



(b) $20 \leq t < 26$

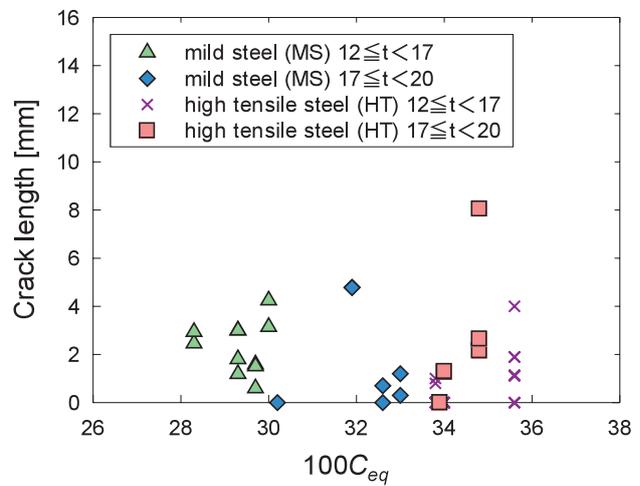
第10図 母材延性の影響

5. 切断面の硬さと粗さの影響

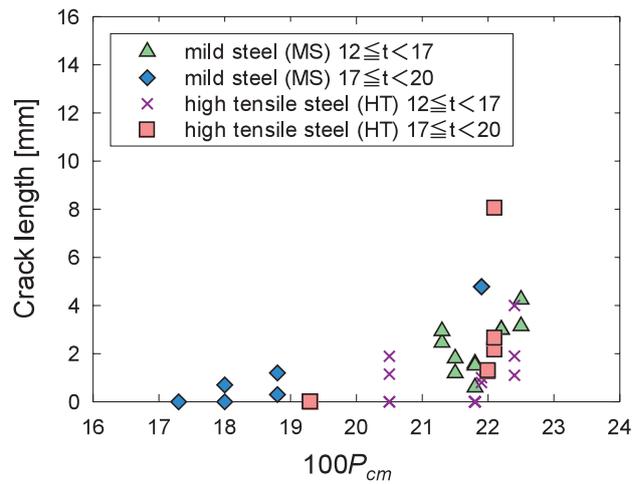
前章でき裂長さがひずみと母材延性だけで制御できないことが判明したため、他の影響因子として可能性のある切断面の硬さと粗さを調査した。

5.1 C_{eq} と P_{cm} の影響

C_{eq} と P_{cm} は、熱影響部の硬化に影響するとされるため、試験結果を C_{eq} と P_{cm} を用いて整理した。第11図では、 C_{eq} とき裂長さの明瞭な関係は示していないが、第12図では P_{cm} がき裂長さに影響する可能性を示している。そこで、ラズマ切断による熱影響部の硬さ試験を実施した。



第11図 C_{eq} の影響



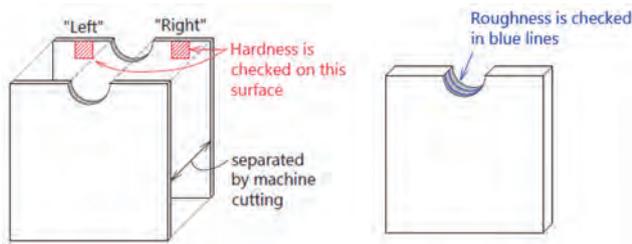
第12図 P_{cm} の影響

5. 2 硬さ試験及び粗さ試験結果

硬さ試験及び粗さ試験の試験片採取位置を第 13 図に示す。試験片の諸元は第 6 表に示す。

硬さ試験の結果は第 14 図に示す。横軸は計測点と切断面の距離である。この結果から、切断面付近で硬さが急激に上昇していることが確認された。また、切断面からの距離が 1mm~5mm の間では、母材強度が高い高張力鋼の方が硬いが、0mm~1mm の範囲では、軟鋼のほうが高張力鋼よりも硬化していた。矢島ら⁴⁾によれば、母材の P_{cm} がプラズマ切断面の硬化に影響すると報告されている。本研究においても、第 6 表に示すようにより硬化していた軟鋼の方が P_{cm} は大きかった。また一般的に、熱影響による硬化の程度は炭素量に依存するとされるが、試験片の炭素量は軟鋼の方が高かった。硬化は延性破壊の発生リスクを高めると考えられるため、母材延性が良好な軟鋼であっても、プラズマ切断後の硬化の程度によっては高張力鋼よりもき裂が生じやすい状況となる可能性がある。

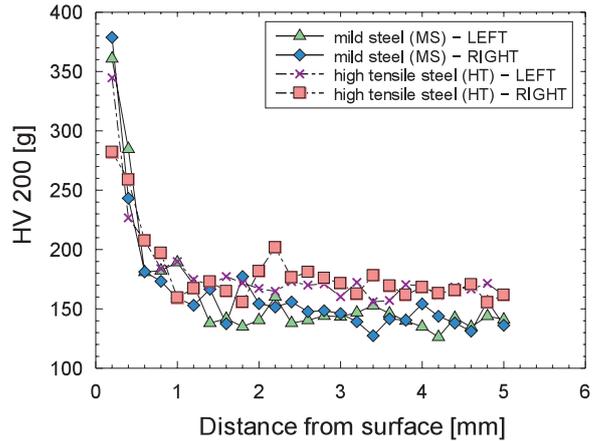
軟鋼と高張力鋼の切断面粗さについては、写真 7 に示す切断面付近の拡大写真を使用して比較した。写真ではき裂に影響を与えるような違いは確認できない。軟鋼の試験片については、3次元計測走査電子顕微鏡 (3D-SEM) を使用し第 15 図に示すデータを採取した。このデータからも、き裂に影響する可能性のある切断面の特徴は見られなかった。したがって、軟鋼と高張力鋼の粗さには、き裂長さに影響するような有意な差はないと判断する。



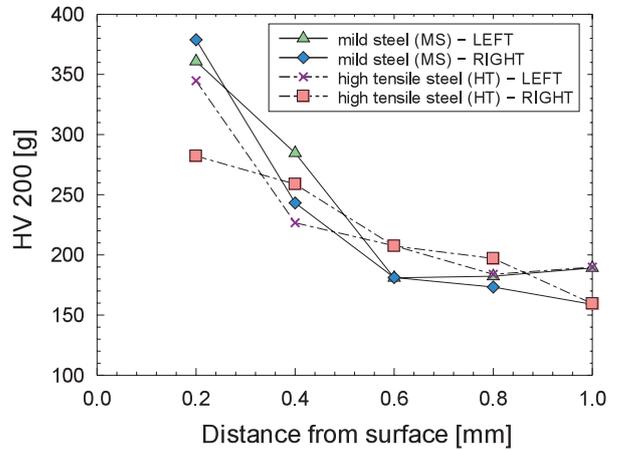
第 13 図 硬さ試験及び粗さ試験の試験片採取位置

第 6 表 硬さ試験及び粗さ試験の試験片諸元

| MS HT | t [mm] | elongation [%] | yeild stress [Mpa] | Chemical composition [%] | | |
|---------|-----------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|---------------|
| | | | | C x100 | C_{eq} x100 | P_{cm} x100 |
| MS | 18.2 | 30 | 298 | 17 | 31.9 | 21.9 |
| HT | 17.2 | 21 | 479 | 15 | 34.6 | 21.4 |



(a) 5mm from surface



(b) 1 mm from surface

第 14 図 プラズマ切断面近傍の硬さ分布

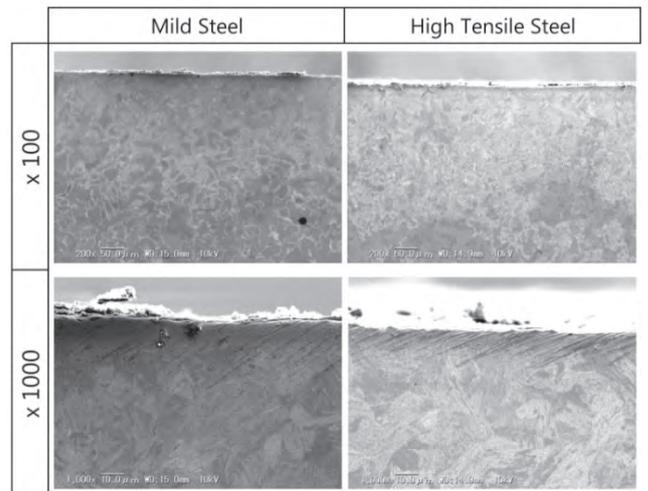
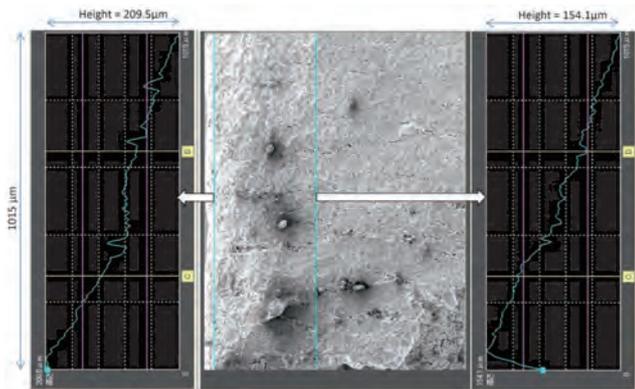


写真 7 粗さ比較用の顕微鏡写真

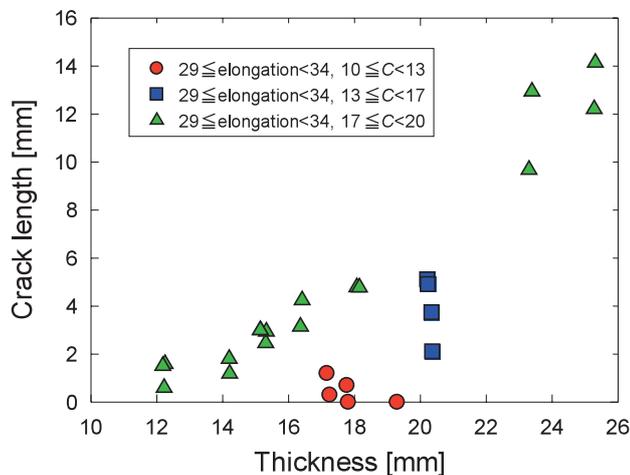


第15図 プラズマ切断面の3D-SEMデータ (軟鋼)

6. 延性き裂に対する支配的要因

6. 1 き裂長さに影響を及ぼす支配的要因

破面観察で延性破壊が確認されたことから、き裂長さに影響を及ぼす支配的要因として、ひずみ（本研究では板厚に相当）と母材延性を挙げる。また、硬さ試験の結果から、切断面硬さも支配的要因の一つである可能性が高い。第16図では、硬化の指標であるC量が多いほどき裂長さが長くなっていることが確認できる。



第16図 母材延性、C量が同等な場合の板厚影響

6. 2 冷間曲げ加工時のプラズマ切断面における

延性破壊パラメータの提案

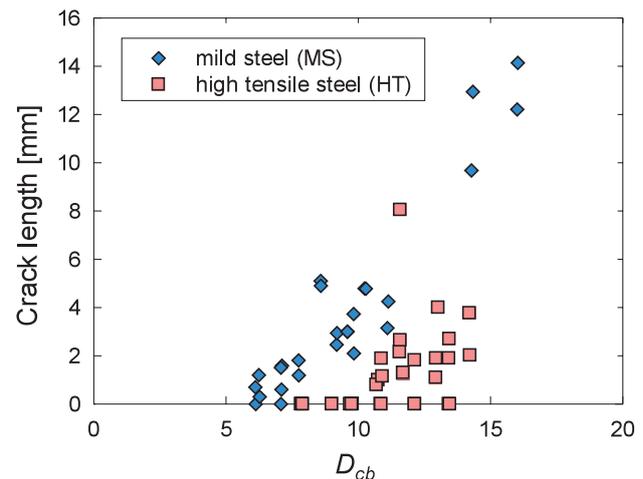
前述したき裂の支配的要因を検証するために、式(3)に示す延性破壊パラメータ D_{cb} を提案する。この式は、ひずみと硬化はき裂を助長し、母材延性はき裂抑制の働きをするという単純な考えにより考案した。ここで、ひずみは板厚 t 、母材延性はミルシートに記載されている伸び (EL)、硬化の

影響はC量で表される。第17図は D_{cb} でき裂長さを整理したグラフで、軟鋼、高張力鋼のそれぞれで相関を示した。この結果は、ひずみ、母材延性、切断面硬化が支配的要因であることを示している。しかし、軟鋼と高張力鋼で明確な傾向の差を示した。一般に、軟鋼と高張力鋼の差はミルシートの機械的特性に表れており、この差（今回は母材延性）はすでに D_{cb} に組み込まれている。よって、別の要因を検討する必要がある。

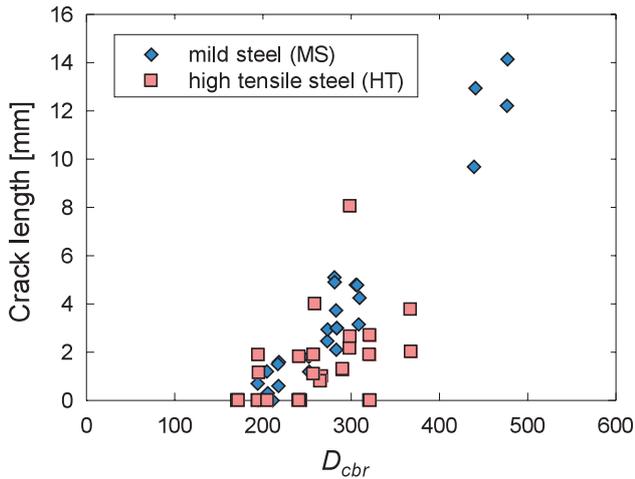
延性破壊に関する多くの論文において、延性破壊開始初期のマイクロボイド生成サイトに介在物の影響があると報告されている^{5), 6)}。そこで、 Mn (マンガン)、 S (硫黄) の影響を考慮するために、式(3)を式(4)に修正し D_{cbr} ⁷⁾ とした。第18図は D_{cbr} でき裂長さを整理したグラフである。このグラフでは軟鋼と高張力鋼のデータに有意な差は見られず、すべてのデータは1つの傾向に集約している。したがって、 D_{cbr} で試験結果は説明可能であり、介在物の影響もき裂の支配的要因の一つであることを示している。

$$D_{cb} = \frac{t}{EL} C; \quad (3)$$

$$D_{cbr} = \frac{t}{EL \frac{1}{MnS}} C. \quad (4)$$



第17図 D_{cb} とき裂長さの関係

第18図 D_{cbr} とき裂長さの関係

7. 結言

本研究では、造船所で頻繁に行われる冷間曲げ加工によって生じる微小き裂を調査し以下の所見を得た。これらは微小き裂の防止策を検討する上で有用な知見となる。

1. 冷間曲げ加工によってプラズマ切断面に生じた微小き裂は延性破壊であった。
2. 延性破壊は有限要素解析で引張ひずみが最も大きい場所で発生した。
3. 一般に良好な延性を有する軟鋼であっても、高張力鋼より長いき裂を有する場合がある。
4. 冷間曲げ加工時にプラズマ切断面上に生じる微小延性破壊に影響を及ぼす支配的要因は、ひずみ、母材延性、切断面硬度、及び介在物である。
5. これらの支配的要因を考慮して、き裂長さを評価する延性破壊パラメータ D_{cbr} を提案した。

謝辞

本研究は、弊社と新日鐵住金株式会社殿との共同研究の一環として活動致しました。多くのアドバイスとサポートを頂きました共同研究メンバーの皆様には、本誌上をお借りして深く御礼申し上げます。また、曲げ試験に際しご協力を頂きました関係部署の皆様にご感謝申し上げます。

参考文献

- 1) International Association of Classification Societies: Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, 2017.
- 2) MSC Software ウェブサイト: MSC Marc2013, <http://www.mssoftware.com/product/marc>
- 3) 日本規格協会: JIS ハンドブック 2 鉄鋼II, JIS G 3114, 2004年, pp. 58
- 4) 矢島浩, 高允宝, 石川忠, 皆川昌紀, 廣田一博, 久保智也: プラズマ切断部の大気中疲労強度に関する一考察, 西部造船会第105回例会, 2002年, pp. 12.
- 5) D. C. HILL, D. E. Passoja: "Understanding the role of inclusions and microstructure in ductile fracture", welding research, 1974
- 6) A. Srivastava, L. Ponson, S. Osovski, et al: "Effect of inclusion density on ductile fracture toughness and roughness", Journal of the Mechanics and Physics of Solids 63 (2014) p. 62-79.
- 7) K. Takahashi, S. Yamatoki, T. Namegawa, M. Kinoshita, M. Fujioka: "Dominant Factors Influencing Ductile Fracture on Cutting Surface during Cold Forming", OMAE 2018