定です。

(2) 今回の引張試験では、伸びが予歪量の増加とともに単調に減少する傾向は見られませんでした。引張強さについては、試験結果のばらつきであると考えています。予歪材製作時に発生したS字変形や樽型変形の影響、および小形(直径5 mm, 3 mm)の試験片を使用した影響などが、データのばらつきとして現れたものと考えています。

(3) 今回の引張試験では、試験片が小形であること、評点間外側で破断する試験片が多かったことなどから、Fig. 5に対応した真歪～真応力関係のデータを計測することが出来ませんでした。Fig. 15(a)を御指摘のようにプロットしなおし(Fig. A), 線形等方硬化モデルの妥当性を確認しました。

59 Small-Size Fracture Toughness Specimen with High Plastic Constraint Generated by Mechanical Heterogeneity

【討論】松村裕之, 道場康二君 (1) Fig. 14によれば, $es = 0.2$ mmなら板厚の影響は小さく, $es = 0.4$ mmの場合では板厚の増大につれてWeibull応力が大きくなる傾向が顕著に現れています。ここで2.5 mm, 5 mmを超えた板厚では, さらにWeibull応力が大きくなり, ASTM E399の K_{Ic} 有効条件を満足しやすくなることが推定できます。しかし, 一方で es が大きくなれば, Weibull応力は小さくなる(Fig. 12)ことから, 5 mmを超えた板厚では, 結論にあるような es が $0.08B$ 以下との条件式は必ずしも成立しないことも考えられます。したがって, $\sigma_y^H/\sigma_y^B \geq 2.0$ と同様に板厚についても5 mm以下の制約条件を付加する必要はないでしょう。また, 本研究では, 板厚を5 mm以下とかなり薄板での範囲でのみ検討されていますが, 5 mm超10 mm前後の範囲においては, 研究意義が薄れる理由が何かあるのでしょうか。

(2) 塑性拘束の程度に対応するWeibull応力に影響する因子として, ここで検討された試験片形状(es , WL)や寸法(B), 強度差(σ_y^H/σ_y^B)の他に, 切欠き比や負荷様式, 材料特性などが考えられます。ここで, 加工硬化係数や縦弾性係数などの材料特性が, Weibull応力に及ぼす影響が軽微であるならば, 本研究でご提案の薄板小型靱性試験法は, 材料の種類に依存せず, 例えばAl合金やTi合金などの非鉄材料への適用が可能となることが期待できると考えます。このような点から, 加工硬化係数や縦弾性係数などの材料特性がWeibull応力に及ぼす影響について, 知見がございましたらご教示願います。

【回答】(1) 硬化部/母材境界からき裂面までの距離 es を大きく設定すると, 硬化部による塑性拘束の程度が小さくなって本論文に示したようにcrack driving forceとしてのWeibull応力が低下します。A204A鋼を対象とした本論文の計算では, es を厚さ $B = 2.5$, 5 mmの試験片に対して $es = 0.2$, 0.4 mmと2レベル設定し, この範囲内では $es \leq 0.08B$ ならASTM E399に規定の K_{Ic} 相当の拘束(Weibull応力レベル)が得られることを確認しました。しかし, ご指摘のように, 質問(2)とも関連しますが, crack driving forceとしてのWeibull応力は材料の加工硬化特

性などの影響を受けるので, 今後はこの点も含めて小型試験片で十分な塑性拘束を得るための条件について明らかにしていきたいと考えています。なお, 本論文では稼働状況下の圧力容器の靱性特性を把握することを想定して, 実機の圧力容器から試験片を採取するためには試験片厚さはなるべく小さい方がよいとの観点から, 厚さ5 mm程度以下の試験片を対象とした検討を行いました。このような制限条件がない場合には, 当然のことながらより厚い試験片を使用する方が, 強い拘束状態を得るための条件設定が容易になります。

(2) ご指摘の通り, Weibull応力は試験片の切欠き長さ比や負荷様式, さらに, 材料の加工硬化特性などの影響を受けます。これらの因子の影響についてはすでに別途検討を行っており, そこで得た知見を活用しながら今後さらに検討を加え, 本論文で提案する強度ミスマッチによる塑性拘束を利用した小型破壊靱性試験方法の確立を図りたいと考えています。

【討論】半田恒久, 久保高宏君 (1) K_{Ic} 条件を満足するためのHard Zoneの幅が $0.08B$ と非常に狭くなっておりますが, 実際にこの様な狭い間隔でHard Zoneを設けることは可能なのでしょうか。

(2) Fig. 9(b)において, $B=2.5$ と $B=5.0$ では応力三軸度(σ_H/σ_B)の分布が異なっており, $B=5.0$ より $B=2.5$ の方が板厚中心部の値を除き低い値となっております。5節のローカルアプローチを用いた解析結果から, どちらも K_{Ic} 条件を満足していると考えられますが, $B=2.5$ の場合の様に板厚方向の応力三軸度分布に一定領域が無い場合に, Validと考えるのは適切なのでしょうか。お考えをお聞かせ下さい。

(3) Fig. 14(a)および(b)の $B=5.0$ の結果において, Hard Zone間隔が広い(b)の結果の方が狭い(a)の結果よりValid Zoneの内側に分布しております。直感的にはHard Zone間隔が狭いほど塑性拘束が大きくなり(a)の結果の方がValid Zoneの内側に分布する様に思われるのですが, この場合どの様に解釈すればよろしいのでしょうか。

【回答】(1) 前報(造船学会論文集, 第177号(1995), pp 269-276)で示したように, レーザ溶接を適用することにより, 厚さ $B = 2.5, 5.0$ mmの試験片に対して e_s (硬化部/母材境界からき裂面までの距離) = 0.2 mmの条件を実現し, 同時にこの条件でき裂先端部の材質は母材と同等であることを確認しています。ただし, レーザ溶接による硬化部の形状は本論文のようにI型ではなく現実にはX型であり, その場合試験片厚さ中央部では硬化部/母材境界からき裂面までの距離は0.4 mmとなっていました。

(2) Fig. 9(b)に示したように, 当然のことながら $B = 5.0$ mmの試験片の方が $B = 2.5$ mmの試験片よりも板厚中心部で応力3軸度が強くなる領域の寸法が大きくなります。その結果, Fig. 14に示したように $B = 5.0$ mmの方が $B = 2.5$ mmに比べて, 容易にASTM E399に規定された K_{Ic} 相当の拘束度(Weibull 応力レベル)を得ることができます。Fig. 14の斜線領域はそのWeibull 応力レベルを示しており, $B = 5.0$ mmの計算結果はほぼ全CTOD範囲でこの斜線領域に含まれています。しかし, 拘束の程度の小さな $B = 2.5$ mmの試験片でも e_s を小さく設定すれば, 変形の少し進んだ $0.02 \text{ mm} \leq \delta$ ではWeibull 応力は斜線領域に含まれるようになり, このような変形レベルで破壊が発生する条件下では本論文の定義によるvalidな結果を得ることができます。

(3) 一般に, 硬化部/母材境界からき裂面までの距離 e_s が小さい方が塑性拘束の程度が大きくなるため, 同じCTODレベルではWeibull 応力の値が大きくなります。実際, Fig. 14の計算結果でも $B = 5.0$ mmの試験片では, $0.015 \text{ mm} \leq \delta$ の変形レベルでは $e_s = 0.2$ mmの方が $e_s = 0.4$ mmに比べて大きなWeibull 応力を示しています。しかし, それよりも小さな変形レベルでは逆に, $e_s = 0.4$ mmの方がWeibull 応力が大きくなっています。これは, Weibull 応力はき裂先端近傍における母材領域での応力を高応力域で積分したパラメータに相当しており, 小さな変形レベルでは硬化部による塑性拘束による応力上昇がそれほど期待できず, Weibull 応力の積分領域の体積の方が支配的($e_s = 0.4$ mmの方が $e_s = 0.2$ mmより積分領域が大

きい)となるためです。すなわち, 材料の靱性レベルが著しく低くて, 硬化部の存在による塑性拘束が発現しないような小さな変形レベルで破壊が生じるときには, 材料体積が支配的な弾性拘束の方が強く現れ, このような場合には本手法の適用は効果的でないといえます。

【討論】粟飯原周二君 (1) ワイブルの形状母数 m は材料により変化すると思われま。貴論文では $m = 20$ 一定としていますが, この値を変化させた場合, K_{Ic} 等価条件にどのような影響が現われるかご教示下さい。

(2) Fig. 13において, 塑性拘束の厳しい $\sigma_Y^H/\sigma_Y^B = 3.6$ と5.0に対する曲線が, K_{Ic} 条件に対応する曲線より大きく上方に位置していますが, これは K_{Ic} 条件を満足する試験片よりも低い限界CTOD値が現われることを意味するのでしょうか, あるいは, Valid Zone内であれば下限界CTOD値が得られるのでしょうか, ご教示下さい。

【回答】(1) ご指摘のように, 本論文で示したワイブル応力に基づく K_{Ic} 等価条件は材料定数である形状母数 m の影響を受けます。計算で用いた $m = 20$ は, 構造用鋼について報告されている m 値の平均的な値です。 $15 \leq m \leq 25$ の範囲では, ワイブル応力の性格上, $m = 20$ の場合の結果とそう大きな差はないと思われまますが, 今後の検討課題とさせていただきます。

(2) Fig. 13の $\sigma_Y^H/\sigma_Y^B = 3.6$ および5.0のワイブル応力 σ_w が K_{Ic} 条件相当のワイブル応力よりも大きいという結果は, ご指摘のように K_{Ic} 条件を満たす均質材試験片よりも低い限界CTOD値が出現しうる可能性を示唆しています。ただし, Fig. 13はCTODとワイブル応力の関係という観点からの変形挙動を示したもので, 試験片の破壊条件を含んでいません。著者らの従来の検討によれば, 構造用鋼では脆性破壊は式(4)で $V_0 = 1$ (単位体積)とすると $\sigma_w = 3\sigma_Y$ (σ_Y :材料の降伏応力)程度で生じており, 硬化部を設けた試験片ではFig. 13に示したようにワイブル応力が非常に大きくなる以前の変形レベルで脆性破壊が発生することが考えられます。ご指摘の点については, 実験的検討も含めて今後, 定量的に検討させていただきます。

60 スマートストラクチャ概念の船体構造への適用に関する基礎研究(第1報)

【討論】福田武人君 (1) 測定可能なひずみ速度の範囲はどれくらいですか。例えば, 低引張試験, 振動試験などの測定は可能ですか。

(2) 振動試験では, パワースペクトルでひずみの周波数解析を行っているが, ひずみ値は測定できますか。

(3) 光ファイバ単体の破断ひずみが0.5%になっているが, 以前われわれがエポキシ樹脂に埋め込んで求めた値

は約1.5%程度でした。用いた光ファイバが異なると思いますが, 著者らの値はかなり小さいと思います。

【回答】(1) 本研究で用いたレーザ速度計の測定範囲は $1 \mu\text{m/s} \sim 1 \text{ m/s}$ で, ゲージ長さには依存しません。したがって例えば, ゲージ長さ50 mmでは測定可能なひずみ速度は $20 \mu\text{E/s}$ となります。また引張速度が 0.06 mm/min といった非常に低速の引張試験, 100 kHzまでの振動試験