

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401
研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2012～2014
課題番号：24560132
研究課題名(和文)加工限界のひずみ履歴・材料組織依存性評価のためのマイクロ数値損傷モデルの構築

研究課題名(英文)Development of Damage Model for Estimation of the Effect of Strain History and Heterogeneous Microstructure on Ductile Failure

研究代表者
大畑 充(Ohata, Mitsuru)
大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20294027
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：二相組織鋼材中のひずみや応力の局在化挙動を再現するための数値解析モデルとして、ポロノイ法を利用して実材料不均質組織形態を再現可能な三次元不均質組織形態モデル化手法の提案とプログラミングを完了させた。さらに、数値損傷モデルとして、過去に提案した数値損傷モデルに、バウシinger特性の力学的特性と材料学的特性を導入することで、ひずみ履歴変化に伴う材料強度と損傷の発展をシミュレートする新数値損傷モデルを提案した。提案した解析モデルと数値損傷モデルを併用することで、フェライト-パーライト二相組織鋼材の延性損傷限界とそのひずみ履歴依存性が概ね予測できることを示した。

研究成果の概要(英文)：3D micro-structural FE-model was developed for analyzing the stress/strain localization behaviors by micro-structural strength mismatch. Ductile damage model for reproducing damage evolution up to micro-void/micro-crack formation was also proposed taking the "Baushinger effect" of the materials into account. The combination of the 3D micro-structural FE-model and the proposed numerical damage model was verified to predict effect of strain history and volume fraction of a second phase of two-phase steel on ductile fracture limit. This numerical simulation was found to correlate micro-structural characteristics with mechanical properties including stress-strain curve and strain history effect on ductile failure of two-phase steel.

研究分野：損傷・破壊力学

キーワード：延性 成形限界 損傷 複合組織鋼 シミュレーション 歪履歴依存 不均質組織

1. 研究開始当初の背景

材料の成形限界評価には、工業的には実験データに基づいて作製される成形限界線図が用いられる。しかし、加工中におけるひずみ履歴が複雑な多工程成形などに対応可能な限界条件の提案はなされていない。一方、材料的には、強度や加工性など優れたマルチ特性バランスの発現に効果的な複合組織材料のさらなる革新化が期待されるが、不均質組織形態と成形限界との関係は明確にされていない。材料を均質連続体として取り扱い、古典的な損傷メカニクスを用いて複雑なひずみ履歴を受ける場合の成形限界をシミュレートする手法が提案されてはいるが、強度・加工性・成形性を向上させるための材料組織形態のあり方にフィードバック可能な手法は未だ構築されていない。

このような背景に基づき、著者は以下の成果を蓄積してきた。

- (1) 複合組織鋼材の一方引張負荷による延性損傷限界は、マイクロボイド形成に至るまでのナノ・サブミクロン損傷の進展挙動に支配されるという、従来とは異なる新しい知見を得ている。
- (2) ナノ・サブミクロン損傷と材料強度を連成する新しい塑性ポテンシャル(数理損傷モデル)を提案している。従来の損傷モデルに対する有意性は、材料の基本機械的特性の情報のみから損傷パラメータを一義的に決定できる点にある。
- (3) 複合組織鋼材における不均質組織形態がもたらす応力/歪場の局在化挙動を捉えるための、実組織 Morphology を再現する解析モデル作製方法を構築している。

このような提案した数理損傷モデルを三次元不均質組織形態モデルの各結晶組織に導入することで、ひずみ履歴によって異なる成形加工限界、さらにはその複合組織形態依存性をシミュレーションできるのでとの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究は、材料の成形加工時の破断限界(成形加工限界)に及ぼすひずみ履歴の影響を定量的に予測でき、かつ、成形性に加えて成形限界の向上に効果的な微視的材料組織形態の制御指針を導くことのできる“材料-性能融合型損傷限界シミュレーション手法”を構築することを目的とする。そのため、材料組織の不均質形態(強度、材質および形状の不均質形態)がもたらすマイクロ損傷進展挙動に着目し、それを再現可能なマイクロ数理損傷モデルを提案する。

3. 研究の方法

二相組織材料の延性の歪履歴依存性は、組織不均質に起因する結晶粒ごとの塑性変形の不均一と、それによる損傷の蓄積過程に起因するものと考えられる。本研究では、二相組織材料としてフェライト-パーライト鋼を対象とし、以下の研究アプローチにより目的達成のための検討を進めた。

- (1) 複合組織鋼材の成形加工限界(延性損傷限界)に及ぼす負荷ひずみ履歴依存性と材料組織形態との関係を系統的实验により明確にする。
- (2) 不均質材料組織形態に依存した、ひずみ(損傷)局在化挙動と、負荷ひずみ履歴の変化に伴うその進展挙動を解明する。
- (3) 鋼材組織レベルでの力学的不均質がもたらすひずみ(応力)の局在化挙動を捉えるため、実鋼材組織形態を再現する数値解析用モデル作成手法を構築する。
- (4) ひずみ履歴変化に依存した、材料強度とナノ・マイクロ損傷を連成する新しい塑性ポテンシャル(数理損傷モデル)を提案する。
- (5) (1)~(4)に基づく新しい延性損傷限界シミュレーション手法を構築し、負荷ひずみ履歴が異なる場合の延性限界予測および材料組織形態依存性評価に適用できることを実証する。

実験には、主として添加元素をほとんど含まない炭素鋼を用いることとし、炭素量と熱処理のみを制御してパーライト体積分率20%、65%を目標値としたフェライト-パーライト二相材(それぞれ FP20 材、FP65 材)と、各構成相と同等の組織特性を有するフェライト単相材(F 材)とパーライト単相材(P 材)を用いた。延性の負荷履歴依存特性の評価には、図1に示す要領の試験を実施した。まず、平滑丸棒引張試験により軸方向に真歪($\epsilon_{L,pre}$)30%の予歪を付与し、その後、この予歪試験片から引張軸と同方向(LL-type)および垂直方向(LT-type)に微小試験片を採取して引張破断試験を行った。微小引張試験片の形状と寸法は図2に示すとおりである。

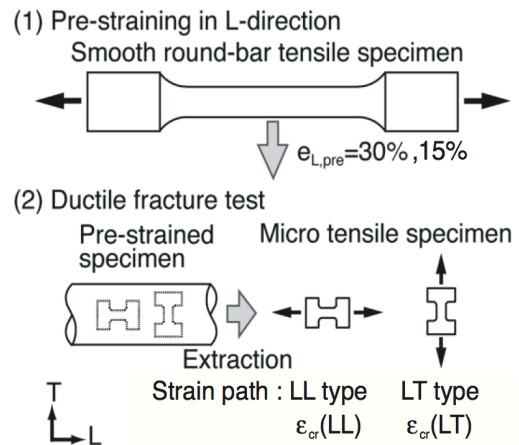


図1 延性の歪履歴依存特性の評価試験概要

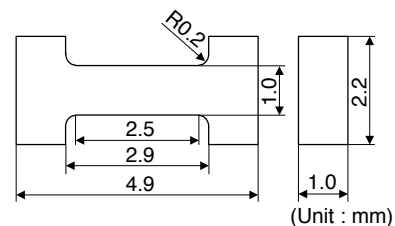
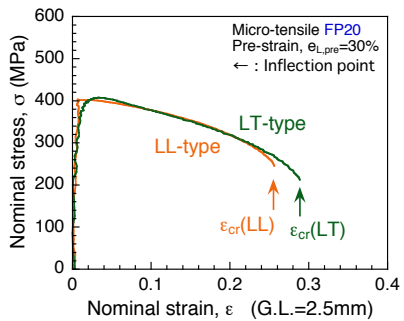


図2 微小引張試験片

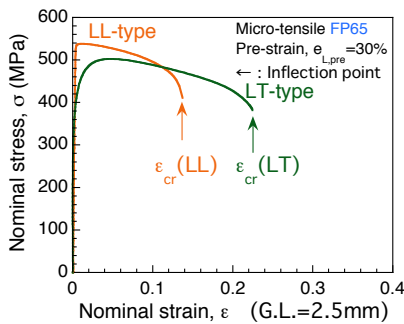
4. 研究成果

(1) 延性の歪履歴依存特性と組織依存性

30%予歪を与えたFP20材及びFP65材について、方向を変化させて荷した際の応力-歪曲線を比較した結果を図3示す。一様伸びレベルである30%もの予歪を与えていることから、LL-typeでは一様伸びがほとんど消失しているのに対して、LT-typeではラウンドハウス型の降伏挙動を呈し、一様伸びも現出している。また、LL-typeに比べてLT-typeの方が破断延性(e_{cr})が大きくなることがわかった。各鋼材のLL-type試験片に対するLT-type試験片の破断延性の比($e_{cr}(LT)/e_{cr}(LL)$)を図4に示すが、フェライト単相材(F材)では荷方向の変化に伴う破断延性に差が無いのに対し、二相材では荷方向を90°変化させた方(LT-type試験片)が延性の向上が見られることがわかり、その傾向はパーライト分率の大きいFP65材の方が顕著であることがわかった。



(a) FP20



(b) FP65

図3 応力-歪特性に及ぼす歪履歴の影響

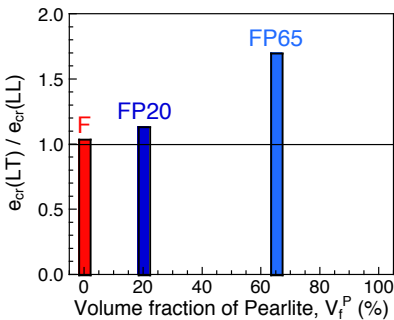


図4 延性の歪履歴依存性と第二相分率の影響

(2) 歪履歴依存性を考慮した延性損傷数理モデルの提案

本実験・観察から、二相組織鋼における延性の歪履歴依存性を予測するためには、組織不均質による歪や応力の局在化挙動と損傷挙動およびそれらに及ぼす歪履歴の影響を再現する必要があることが示唆された。そこで、荷方向の変化によって現れるバウシinger効果を考慮し、従来から提案している延性損傷モデルの拡張を試みた。

従来から提案している延性損傷数理モデルは、対象鋼材の延性き裂を支配していると考えられるマイクロボイドの発生を、材料損傷の蓄積によるナノ・サブミクロンサイズボイドの発生・成長と仮想し表現したものである。Gurson-Tvergaardの損傷モデルをベースとした式(1)に示す新しい塑性ポテンシャル関数を提案することで、マイクロボイドが発生するまでの損傷の増加と材料の弾塑性挙動を連成させて同時解析を可能とした。

$$\Phi = \left(\frac{\bar{\Sigma}}{\bar{\sigma}}\right)^2 + a_1 D^* \exp\left(a_2 \frac{\Sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) - 1 = 0 \quad (1)$$

ここで、 a_1, a_2 : 損傷パラメータ、 D^* : 有効損傷度、 $\bar{\Sigma}$: 損傷を含むユニットセルの相当応力、 $\bar{\sigma}$: 材料マトリックスの降伏強度、 Σ_m : ユニットセルにかかる平均垂直応力である。

本研究では予歪を与えた試験片の力学的特性を再現するためにバウシinger効果を考慮して、式(2)に示す複合硬化則を材料の構成則として導入し、式(3)のように塑性ポテンシャル関数を修正した。

$$S_{ij} = \Sigma_{ij} - A_{ij} \quad (2)$$

$$\Phi = \left(\frac{\bar{S}}{\bar{s}}\right)^2 + a_1 D^* \exp\left(a_2 \frac{S_m}{\bar{s}}\right) - 1 = 0 \quad (3)$$

ここで、 S_{ij} : 応力テンソルの等方成分、 A_{ij} : 背応力テンソル、 \bar{S} : ユニットセルの降伏強度の等方成分、 \bar{s} : 材料マトリックスの降伏強度の等方成分、 S_m : ユニットセルの平均垂直応力の等方成分である。

さらに、材料内部の転位構造発展が背応力の発展に対応するとし、図5に示すように、先行する荷における最大背応力を超えるまでは材料損傷は進展しないという累積有効損傷概念を損傷進展則として用いた(式(4))。

$$dD = \begin{cases} 0 & \text{for } \bar{A} \leq x\bar{A}_{\max} \\ (1-D) |dE_m^p| & \text{for } \bar{A} > x\bar{A}_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

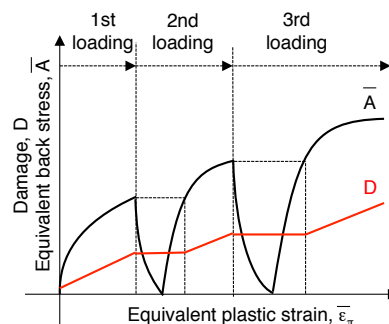


図5 累積有効損傷概念

(3) 延性損傷シミュレーションによる歪履歴依存性予測

本実験で同定した二相組織鋼を構成する各構成相の材料特性から、提案した延性損傷シミュレーション手法を適用して、フェライト-パーライト二相組織鋼の延性の歪履歴依存性の予測を行った。ここで使用した延性損傷シミュレーションとは組織不均質による応力/歪の局在化挙動を表現する三次元不均質組織モデルと、バウシinger特性を考慮した延性損傷数理モデルを使用したものである。

一例として、FP65材のLT-typeの試験片シミュレーションに適用した三次元不均質モデルを図に示す。実験に用いた材料の第二相体積率と平均結晶粒径(85 μ m)を再現したモデルである。

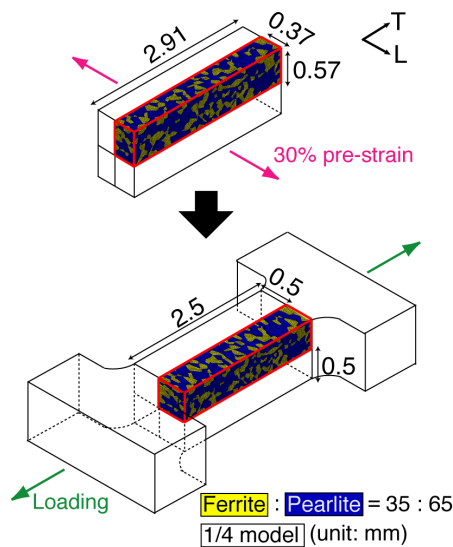


図6 シミュレーションに用いた三次元不均質組織モデル (FP65 : LT-type)

シミュレーションで得られた30%の予歪付与後のLL-typeおよびLT-typeの公称応力-公称歪曲線(標点間距離:2.5mm)を実験結果とともに図7に示す。負荷方向が変化しないLL-typeは実験結果とかなり良い一致を示している。一方、負荷方向が90°変化するLT-typeでは、実験結果に比べて降伏点以降の応力が全体的に高くなっているが、実験で見られた降伏初期のラウンドハウス型の応力-歪応答や、実験と同程度の高い破断延性が再現できており、本手法を用いることで二相組織鋼の延性の歪履歴依存性を比較的良い精度で予測できることが実証された。

パーライト分率65%の二相組織鋼において、負荷方向が変化した際に見られる延性の大きな向上は、損傷の蓄積領域の変化に加えて、各相(特にパーライト相)のバウシinger効果による応力/歪局在化挙動の緩和とパーライト相の損傷進展の遅延効果によるものであることを明らかにした。

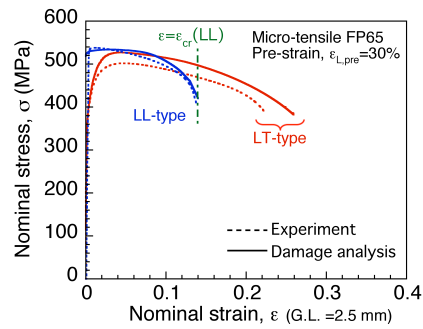


図7 延性に及ぼす歪履歴の影響のシミュレーション結果(実験結果との比較)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 庄司博人, 大畑 充, 南二三吉, 延性き裂進展抵抗を支配する材料延性に及ぼす不均質組織特性の影響予測 -複相組織材料の延性予測-, 鉄と鋼, 査読有, Vol.100, No.5, 2014, 668-677
- ② Mitsuru Ohata, Hiroto Shoji, Fumiyoshi Minami : Hierarchical Ductile Damage Simulation for Structural Performance-Based Material Design, Proceeding of the 4th International Symposium on Steel Science (ISSS2014), 査読有, 3-6, 2014, 1-8.
- ③ 大畑 充, 庄司博人, 南二三吉 : 組織不均質を考慮した三次元延性損傷シミュレーション法 -複相組織材料の延性予測-, 鉄と鋼, 査読有, Vol.99, No. 9, 2013, 573-581
- ④ Mitsuru Ohata, Yusuke Takada, Takahiro Sakimoto, Satoshi Igi, Shigeru Endo and Fumiyoshi Minami : Effect of Mechanical Properties on Tensile Strain Limit for Leakage of High-Pressure Pipe with Surface Crack, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 査読有, Vol.22, No.2, 2012, 157-164

[学会発表] (計5件)

- ① Mitsuru Ohata, Shugo Masai, Hiroto Shoji, Yasuhito Imai, Hiroyuki Motohashi, Fumiyoshi Minami : Numerical simulation of flat-to-slant ductile fracture transition in notched plate, 20th European Conference on Fracture (ECF20), Procedia Materials Science, Vol. 3, 2014, pp.793-798
- ② Hiroto Shoji, Mitsuru Ohata and Fumiyoshi Minami : Simulation model to correlate micro-structural characteristics of two-phase steel with ductile crack growth resistance, 20th European Conference on Fracture (ECF20), Procedia Materials Science, Vol. 3, 2014, pp.1573-1578

- ③ 丸尾茂喜, 大畑 充, 松野 崇, 松田栄作, 瀬戸厚司, 南二三吉: 二相組織材料の延性の歪履歴依存性予測, 溶接構造シンポジウム講演論文集, 2014, pp.439-446
- ④ Mitsuru Ohata, Ken Ikawa, Shugo Masai, Hiroto Shoji Fumiyoshi Minami, Yasuhito Imai and Hiroyuki Motohashi : Damage Model for Simulating Large Ductile Crack Extension Accompanied by Flat and Slant Surface, Proceedings of the 6th International Pipeline Technology Conference, 7-9, October, Ostend, Belgium, S17-03, 2013
- ⑤ 大畑 充, 渡邊育夢, 細川明秀, 松野崇: 三次元不均質組織モデルを用いた延性破壊限界予測, 「複相鋼の延性破壊」シンポジウム概要集, pp.1-5 「構造材料の組織と延性破壊」研究会, (一社) 日本鉄鋼協会 (2013)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大畑 充 (OHATA, Mitsuru)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 20294027

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: