延性二相組織におけるクリープ構成方程式の導出とその適用限界に関する FE 解析

日本大学（院生）〇齋藤 康平　　日本大学　藤原 雅美　高木 秀有　白井 健二

Derivation of Constitutive Equation for Creep of Ductile-Dual Phase Structure and FE Analyses on Its Application Limit

Nihon University　Kohei Saito,　Masami Fujiwara, Hidenari Takagi　and　Kenji Shirai

In order to examine application limits of a theoretical equation on the stress exponent,*n*, for creep in ductile-dual phase structure, FE analysis on tensile deformation are carried out using FE models in which reinforced phases of stripe shape are distributed in a matrix phase. When a reinforced phase is distributed continuously, *n*-values can be obtain accurately in the strain rate range of $1.0\times10^{-8}\mathrm{s}^{-1}\le\dot{\varepsilon}\le1.0\times10^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ by the equation. When the reinforced phases are distributed discontinuously, the equation cannot be used to obtain the *n*-value in the low strain rate range of $\dot{\varepsilon}\le1.0\times10^{-4}\mathrm{s}^{-1}$, due to unsatisfied compatibility of strain rate. On the other hand, *n*-value can be given by the equation in the high strain rate range of $\dot{\varepsilon}\ge1.0\times10^{-3}\mathrm{s}^{-1}$.

１．緒　言

近年，自動車の燃費向上を実現するために，軽量構造材料を用いたパワートレインなどの軽量化が試みられている．この材料の有力候補として，微細結晶粒組織中に筋状の LPSO 構造相を分布させたマグネシウム合金押出材が注目されている．我々はこのような延性二相組織のクリープ構成方程式を導出し，二相全体の引張変形において各相がどのように影響を及ぼし合うかについて理論的検討を行った[1, 2)]．

本研究では, 延性二相組織の応力指数に関する理論式(導出済)の適用限界を調べるために，母相中に筋状の強化相を連続的或いは不連続的に分布させた FE 解析モデルを作成し，引張変形の FE シミュレーションを実施して，二相全体の応力指数に及ぼす強化相の分布状態と変形速度の影響について検討する．

２．延性二相組織のクリープ構成方程式[1)]

Fig. 1 の挿入図は，母相（白色）中に強化相（灰色）が存在する延性二相組織の模式図を示す．この種の二相合金の高温変形挙動は，一般的なベキ乗則に従うとする；

$$\dot{\varepsilon}=A\sigma^{n}\ . \tag{1}$$

ここで，$\dot{\varepsilon}$：変形速度，A：温度に依存する定数，σ：負荷応力，n：応力指数である．各相でも同様なベキ乗則クリープが生じるとし，変形中に次の適合条件が成り立つとする；

$$\dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_1=\dot{\varepsilon}_2\ . \tag{2}$$

ここで，$\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2$ は母相と強化相の平均変形速度である．σ と各相に生じる平均応力 σ_1, σ_2 には，次の複合則が成り立つとする；

$$\sigma=\sigma_1V_1+\beta\sigma_2V_2\ . \tag{3}$$

ここで，V_1, V_2 は各相の体積比，β は強化相の分布状態と変形速度などに関係する強化係数（≤1.0）である．式（1）～（3）より，二相全体の応力指数 n は次式で表される；

$$n=\frac{n_1n_2\left(\alpha V_1+\beta V_2\right)}{\alpha n_2V_1+\beta n_1V_2}\ . \tag{4}$$

ここで，$\alpha=\sigma_1/\sigma_2$ であり，$\dot{\varepsilon}$ の関数でもある．

３．FE 解析

FE 解析は汎用有限要素解析プログラム（ABAQUS）を用いて実施された．FE 解析モデルの大きさは，縦横 3000μm，厚さ 1000μm（Fig. 1 参照）であり，母相と強化相の体積比は $V_1=0.75$，$V_2=0.25$ である．引張速度は $\dot{\varepsilon}=0.7\times10^{-8}\sim1.5\times10^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ である．要素タイプには 8 節点レンガ型を用い, 要素数は 48000 個である．各要素には弾性特性とクリープ特性が設定され[2)]，母相の応力指数は $n_1=2.0$，強化相の応力指数は $n_2=5.0$ とした．強化相の連続性と不連続性は挿入図中に示すように，強化相の幅 w を用いて，横方向のずれ x と縦方向のずれ y によって表す. 本報告では，$y=0$ とし，$x=0,\ w,\ 1.5w$ の場合について検討した．

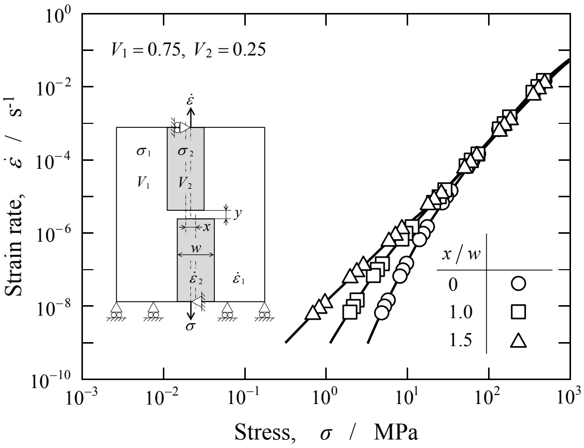

Fig. 1　二相組織の応力指数

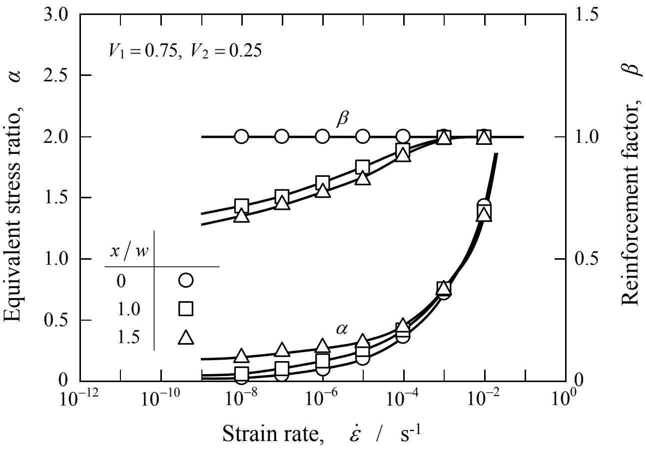

Fig. 2　応力比と強化係数の変形速度依存性

４．解析結果

Fig. 1 は，変形速度 $\dot{\varepsilon}$ と引張応力 σ に関する両対数プロットである．ここで，σ は引張荷重を変形中のモデル上面の面積で除した値であり，各々の場合で一定値をとる．式（1）より，このグラフの勾配は応力指数 n に相当する．高変形速度域 $\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-3}\sim1.0\times10^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ では n 値は $x=0\sim1.5w$ において 2.4 前後の値をとる

が，低変形速度域 $\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-8}\sim1.0\times10^{-4}\mathrm{s}^{-1}$ では x によって異なる値を示す．例えば，$\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-8}\mathrm{s}^{-1}$ の場合，$x=0$ で $n=4.6$，$x=w$ で $n=3.7$，$x=1.5w$ で $n=2.2$ である．このように $x=0$，$x=w$ では，$\dot{\varepsilon}$ が小さくなるにしたがって n 値は大きくなる．他方，$x=1.5w$ ではどの $\dot{\varepsilon}$ でも n 値はほとんど変わらない．

Fig. 2 は，応力比 α と強化係数 β の変形速度依存性を示す．α を見ると，高変形速度域 $\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ の場合，$x=0\sim1.5w$ において $\alpha\cong1.4$ 一定である．一方，低変形速度域 $\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-8}\mathrm{s}^{-1}$ の場合，$x=0$ で $\alpha=0.02$，$x=w$ で $\alpha=0.05$，$x=1.5w$ で $\alpha=0.2$ であり，α は x と共に増加する．次に式（3）から得られた β であるが，高変形速度域 $\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ の場合，$x=0\sim1.5w$ において $\beta\cong1.0$ 一定である．一方，低変形速度域 $\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-8}\mathrm{s}^{-1}$ の場合，$x=0$ で $\beta=1.0$，$x=w$ で $\beta=0.71$，$x=1.5w$ で $\beta=0.67$ であり，β は x が増加すると減少することがわかる．

Fig. 3 は，Fig. 1 の勾配から得られた応力指数（記号）と Fig. 2 の結果を用いて式（4）から計算された応力指数（実線）の変形速度依存性を示す．$x=0\sim1.5w$ において，高変形速度域 $\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ と $\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-3}\mathrm{s}^{-1}$ の場合，応力指数は $n=2.3$ と $n=2.5$ となり，FE 結果と理論値は完全に一致する．低変形速度域 $\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-4}\mathrm{s}^{-1}$ の場合は，$x=0$ では FE 結果と理論値の応力指数は完全に一致するが，$x=w$ では両者の応力指数は $n=2.5$，$n=2.7$ であり，相対誤差は 8%である．また，$x=1.5w$ の相対誤差も 8%である．$x\neq0$ の場合，変形速度 $\dot{\varepsilon}$ が小さくなるにしたがって FE 結果と理論値の応力指数は一致しなくなる．理論式（4）の適用限界を相対誤差 5%まで許容すると，この式は $x=0$ では全変形速度域で，また，$0<x\leq1.5w$ では $\dot{\varepsilon}\geq1.0\times10^{-3}\mathrm{s}^{-1}$ の変形速度域で用いることができる．

次に，FE 結果と理論値の応力指数が変形速度条件によって一致しなくなる理由を検討する．応力指数の理論式（4）の前提である式（3）は強化係数 β を考慮すると常に成立する．そこで式（2）が変形中に成立するか否かを調査する．**Fig. 4** は $x=1.5w$ における相当塑性歪み速度の等高線パターンであり，（a）高変形速度域 $\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-3}\mathrm{s}^{-1}$，(b) 低変形速度域 $\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-6}\mathrm{s}^{-1}$ の結果である．（a）において母相には $\dot{\varepsilon}_1=0.7\times10^{-3}\sim1.3\times10^{-3}\mathrm{s}^{-1}$（平均 $1.1\times10^{-3}\mathrm{s}^{-1}$），強化相には $\dot{\varepsilon}_2=0.6\times10^{-3}\sim1.0\times10^{-3}\mathrm{s}^{-1}$（平均 $0.8\times10^{-3}\mathrm{s}^{-1}$）が生じている．（b）においては $\dot{\varepsilon}_1=2.6\times10^{-9}\sim5.9\times10^{-6}\mathrm{s}^{-1}$（平均 $1.5\times10^{-6}\mathrm{s}^{-1}$），$\dot{\varepsilon}_2=2.5\times10^{-15}\sim1.4\times10^{-6}\mathrm{s}^{-1}$（平均 $1.5\times10^{-8}\mathrm{s}^{-1}$）が生じている．(a) においては $\dot{\varepsilon}\cong\dot{\varepsilon}_1\cong\dot{\varepsilon}_2$ であるが，(b) では $\dot{\varepsilon}\cong\dot{\varepsilon}_1\neq\dot{\varepsilon}_2$ である．**Fig. 5** に，他の FE 結果（$\dot{\varepsilon}=1.0\times10^{-8}\sim1.0\times10^{-2}\mathrm{s}^{-1}$，$x=0\sim1.5w$）をまとめて示す．図中の点線は $\dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_1=\dot{\varepsilon}_2$ の関係を表している．$\dot{\varepsilon}_1$ はどの $\dot{\varepsilon}$ 及び x においてもほぼ点線上にあることから，$\dot{\varepsilon}\cong\dot{\varepsilon}_1$ である．$\dot{\varepsilon}_2$ は，$x=0$ の場合は $\dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_2$ である．一方，$x=w$，$x=1.5w$ の場合，$\dot{\varepsilon}_2$ は $\dot{\varepsilon}$ が小さくなると点線上から外れる．この場合，$\dot{\varepsilon}\leq1.0\times10^{-4}\mathrm{s}^{-1}$ において $\dot{\varepsilon}\neq\dot{\varepsilon}_2$ となるので，式（2）は成立しない．したがって，この変形速度条件下では理論式（4）が成り立たないため，応力指数の理論値は FE 結果と一致しないことになる．

実際のマグネシウム基二相合金における強化相の分布は，模式図のような単純なものではなく乱雑である．現在，実際の強化相の分布を考慮した場合の解析を行っており，その詳細は当日発表する．

5．結　言

（1）強化相が連続の場合（$x=0$），導出した応力指数 n に関する理論式は全変形速度で用いることができる．

（2）強化相が不連続の場合（$x=w$，$x=1.5w$），n 値の相対誤差を 5%まで許容すると，n の理論式は高変形速度域 $\dot{\varepsilon}\geq1.0\times10^{-3}\mathrm{s}^{-1}$ で用いることができる．

（3）強化相が不連続の場合（$x=w$，$x=1.5w$），$\dot{\varepsilon}\leq1.0\times10^{-4}\mathrm{s}^{-1}$ の低変形速度域では適合条件（$\dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_1=\dot{\varepsilon}_2$）が成立しないため，$n$ の理論式を用いることができない．

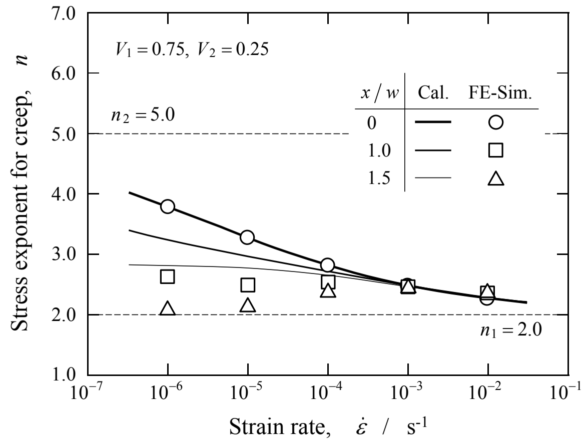

Fig. 3　応力指数の変形速度依存性

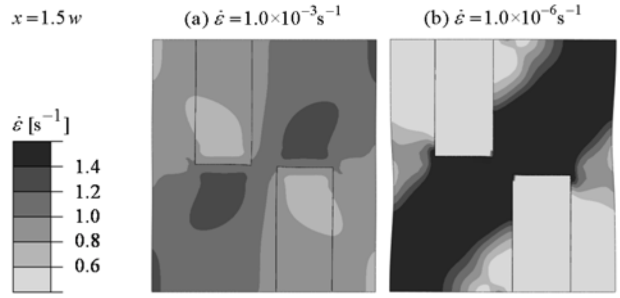

Fig. 4　相当塑性歪み速度の等高線パターン（$\varepsilon=0.08$）
スケールは，（a）に対して $\times10^{-3}$ 倍，（b）には $\times10^{-6}$ 倍

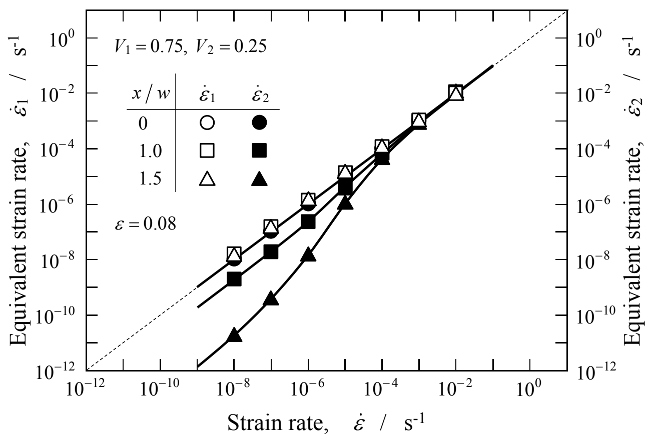

Fig. 5　各相に生じた変形速度の平均値

参考文献

1）藤原，高木，第 57 回日本大学工学部学術研究報告会講演要旨集，(2014)，4-7.

2）齋藤，高木，藤原，小林，白井，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2014)，723-724.