

AI を活用した CAE 解析のための機械的特性の同定

谷口智

Identification of Mechanical Properties for CAE Analysis Using AI

Satoshi TANIGUCHI

Abstract : In this study, flow stress curves for SS400 and polypropylene (PP) were identified by high-speed tensile tests and DIC analysis. Based on the flow stress curves, we proposed a modified Voce's equation that extends Voce's equation to apply to PP. The accuracy of the Voce's equation for PP, which is a resin material, is comparable to that obtained by fitting the parameters of the Voce's equation for SS400, which is a metal material. It was clarified that the flow stress curve can be estimated from the load-displacement curve by training the neural network on the relationship between the flow stress curve and the parameters of the modified Voce's equation.

1. 緒言

工業製品開発にコンピュータシミュレーションを利用する CAE (Computer Aided Engineering) 解析の高度化に伴い、CAE 解析のための詳細な材料の機械的特性取得のニーズが高まっている。たとえば、変形量や応力を計算する構造解析においては、真応力-相当塑性ひずみ曲線（以後、流動応力曲線と称する）が、また更に詳細な機械的特性の例としては、自動車衝突解析における流動応力曲線のひずみ速度依存性などが必要とされる。

一般的には流動応力曲線は万能試験機による引張試験と、ひずみゲージや伸び計などの計測手法で得られる試験結果から、Swift 則¹⁾、Voce 則²⁾などの硬化則で外挿予測しており、金属材料では良く一致するが、多くの樹脂材料の場合は一致しない。ひずみ速度依存性も谷村-三村モデル³⁾などを用いて表すことができるが、同じく対象となる材料種は限られている。そのため、多種多様な材料種の高精度な機械的特性を取得するためには、専用の材料試験装置を用いて詳細な計測を行う必要がある。しかしながら、例えばひずみ速度依存性のある流動応力曲線を詳細に計測するためには、高速引張試験機などの専門性の高い試験装置に加え、DIC(Digital Image Correlation)による計測やくびれ部の多軸応力状態を単軸応力状態へ変換するための逆解析による最適化が必要であり、導入及び実施には費用と時間がかかる。

安藤ら⁴⁾は AI の中でも近年発展著しいニューラルネットワーク（以下、NN と称する）を用い、金属材料を対象として、Swift 則と Voce 則のパラメータをランダムに

変更した流動応力曲線をプログラムで作成し、有限要素法により荷重-変位曲線を計算することで作成したデータを学習させ、NN により流動応力曲線の予測を行い、逆解析による最適化で高精度な流動応力曲線の同定が可能であることを示している。

そこで本研究は、ひずみ速度依存性のある流動応力曲線の簡易的な同定を目的として、樹脂材料と金属材料の両方を対象とし、AI の一種である NN に、実試験で得られる荷重-変位曲線と流動応力曲線の関係を学習させ、試験で比較的容易に得られる荷重-変位曲線から流動応力曲線を予測する NN モデルの作成とその予測精度の評価を行った。

2. 実験方法および実験結果

機械学習用データとして、金属材料である SS400 と、樹脂材料であるポリプロピレン（以下、PP とする）を対象とした高速引張試験のデータを用いた。試験装置は油圧式高速引張試験機 ハイドロショット HITS-T10（島津製作所製）と高速度カメラ Phantom V310(Vision Research 社製)を用いて引張開始から破断までのくびれ部の変形の様子を動画撮影し、DIC 解析ソフトウェア Vic-2D(Correlated Solutions 社製)を用いて流動応力の同定を実施した。

SS400 は、図 1 に示す切欠き半径 16mm、切欠き部直径 4mm の切欠き付き丸棒試験片形状とし、PP の試験片形状は、図 2 に示す JIS K7162-1BA 形状の平板試験片を用いた。

試験速度は、SS400 は高速引張試験装置の固有振動の影響を考慮し 0.1, 0.5, 5, 50, 500 mm/s の 5 速度水準、PP は 0.1, 1, 10, 100, 1000 mm/s の 5 速度水準、 n 数は 2 とした。図 3 と図 4 に SS400 と PP の高速引張試験により得られた荷重—変位曲線の例を示す。

高速度カメラによる撮影データに対して DIC 解析を行い、ひずみが最大となるくびれ部の表面ひずみを計測し、体積一定の仮定のもと、算出した流動応力曲線を硬化則でフィッティングを行った。式(1)に示す一般的に用いられる硬化則の一つである Voce の式は金属材料を対象としているため、SS400 の流動応力曲線の傾向を表現することができるが、PP の流動応力曲線の傾向を表現することができない。よって本研究では、試験により得られた PP の流動応力曲線の傾向を表現できるように、Voce の式を拡張し、式(2)に示す修正 Voce の式を提案し、フィッティングに用いた。ここで、 a, b, c, d はそれぞれ材料固有のパラメータであり、 σ_T が真応力、 ϵ_p が相当塑性ひずみである。

Voce の式

$$\sigma_T = a - b \exp(-c\epsilon_p) \quad (1)$$

修正 Voce の式

$$\sigma_T = a \exp(d\epsilon_p) - b \exp(-c\epsilon_p) \quad (2)$$

修正 Voce の式と試験結果の流動応力曲線の平均の誤差が最小となるように一般化簡約勾配法 (Generalized Reduced Gradient method) を用いて修正 Voce の式の各パラメータを同定した。表 1 と表 2 に SS400 及び PP の修正 Voce の式のパラメータを示す。高速引張試験により得られた流動応力曲線と修正 Voce の式による流動応力ひずみ曲線の例を図 5 と図 6 に示す。SS400 においては、修正 Voce の式において追加したパラメータの d は 0 となり、金属材料に適用可能な通常の Voce の式と同じ結果となっている。また、DIC 解析結果から算出した流動応力曲線と、修正 Voce の式へフィッティングした流動応力曲線の全試験における差分の平均は SS400 で 12.4MPa、PP で 0.74 MPa であった。この値は、全試験における DIC 解析結果から算出した流動応力曲線の真応力の平均値に対して、SS400 では 3.2%、PP では 2.0%の割合であり、PP の方が差分の割合は小さく、修正 Voce の式の PP へフィッ

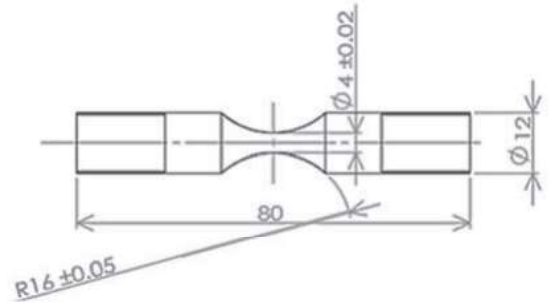


図 1 SS400 丸棒試験片形状

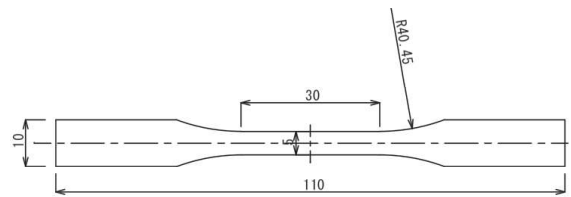


図 2 PP JIS K7161-1BA 試験片形状

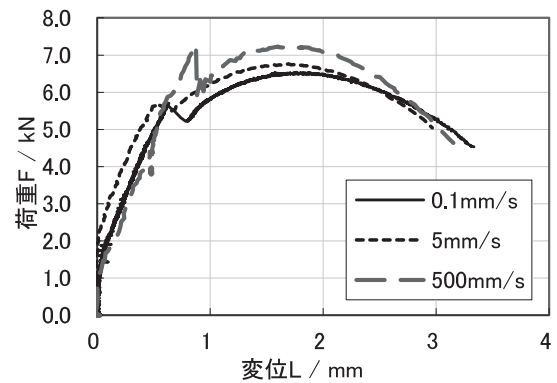


図 3 SS400 の各引張速度における荷重—変位曲線

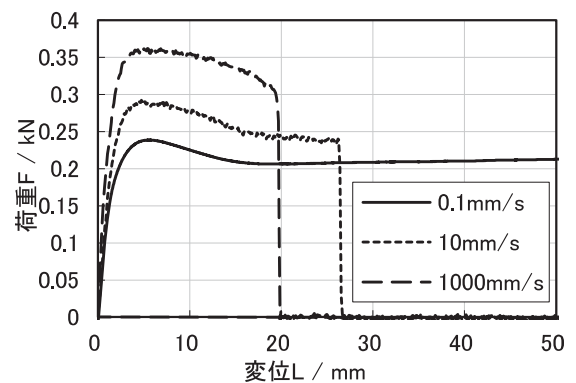


図 4 PP の各引張速度における荷重—変位曲線

ティングした場合の精度は、SS400 のそれと同等以上であり、流動応力曲線の外挿予測に十分に対応できることが分かった。

3. ニューラルネットワークによる予測モデルの作成と予測精度の検証

流動応力曲線を予測する NN モデルを作成するため、2 節で実施した高速引張試験による荷重—変位曲線と修正 Voce の式のパラメータの関係を、検証用データとする引張速度 0.5 mm/s(SS400)及び 1 mm/s (PP) の $n=1$ のデータを除いて NN に学習させた。荷重—変位曲線は共に 101 点となるように均等に分割し、NN の構造は入力層 1 層 (ノード数 101×2)、中間層 2 層 (ノード数 3000 及び 1000)、出力層 1 層 (ノード数 4) とし、学習回数は 1000 回とした。

今回、修正 Voce の式では金属と樹脂でパラメータの値が大きく異なるため、SS400 と PP を分け、それぞれの予測モデルを作成した。学習範囲内の検証用データとして学習に用いなかった引張速度 0.5 mm/s(SS400)及び 1 mm/s (PP) の $n=1$ のデータと、学習範囲外の検証用データとして引張速度 2500 mm/s(SS400)及び 5000 mm/s(PP) で新たに高速引張試験を実施したデータの 2 つの荷重—変位曲線を用いてそれぞれの修正 Voce 式のパラメータの予測を行った。

予測モデルを用いて検証用の荷重—変位曲線から予測した修正 Voce 式のパラメータを基に作成した流動応力曲線 (NN 予測結果) と、試験と DIC 解析により得られた修正 Voce 式のパラメータを基に作成した流動応力曲線 (DIC 解析結果) の例を図 7 と図 8 に示す。また、各材料のひずみ 1.0 までの NN 予測結果と DIC 解析結果との流動応力曲線の真応力の差分の平均を表 3 に示す。この結果より、SS400、PP とともに学習データの範囲内の予測結果に比べ、学習データの範囲外の予測結果の平均の差分は 3 倍程度大きいことが分かる。いずれの予測結果も修正 Voce の式へのフィッティングの差分よりは大きいものの、学習データの範囲内においては、検証データと予測結果はほぼ一致しており、高精度な CAE 解析への利用が期待でき、学習データの範囲外においては、差分があったが、1 割程度であり、固有振動の影響があるために試験が難しい 5000 mm/s を超える速度領域での CAE 解析への利用が期待できる。

表 1 SS400 の修正 Voce の式のパラメータ

材料 - 引張速度	修正 Voce 式のパラメータ			
	a	b	c	d
SS400 - 0.1 mm/s	386.2	1046.1	2.42	0.00
SS400 - 0.5 mm/s	363.4	990.4	3.30	0.00
SS400 - 5 mm/s	421.0	1040.0	2.47	0.00
SS400 - 50 mm/s	416.8	967.8	3.24	0.00
SS400 - 500 mm/s	515.9	977.2	2.99	0.00

表 2 PP の修正 Voce の式のパラメータ

材料 - 引張速度	修正 Voce 式のパラメータ			
	a	b	c	d
PP - 0.1 mm/s	11.84	13.6	54.3	55.1
PP - 1 mm/s	5.04	24.0	86.8	87.9
PP - 10 mm/s	7.94	22.8	69.0	69.8
PP - 100 mm/s	14.56	19.6	85.7	86.2
PP - 1000 mm/s	15.99	22.1	84.4	84.9

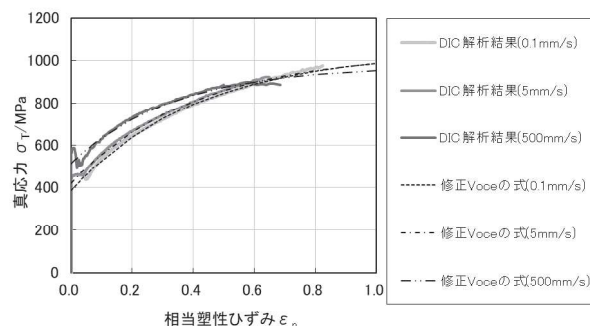


図 5 SS400 の DIC 解析による流動応力曲線と修正 Voce の式にフィッティングした流動応力曲線

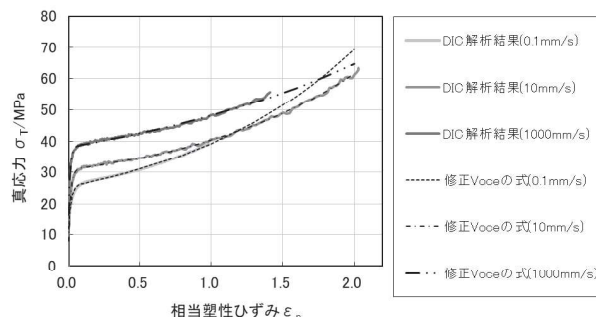


図 6 PP の DIC 解析による流動応力曲線と修正 Voce の式にフィッティングした流動応力曲線

4. 結 言

本研究では、金属材料の SS400 及び樹脂材料の PP を対象として、高速引張試験、高速度カメラ撮影および DIC 解析を組み合わせた計測により流動応力曲線を同定した。

Voce の式を PP へ適応可能になるよう拡張した修正 Voce の式を提案した。この修正 Voce の式へ PP の流動応力曲線をフィッティングした場合の精度は、SS400 の流動応力曲線を Voce の式へフィッティングした場合の精度より高い結果が得られた。

また、試験で得られた荷重—変位曲線と流動応力曲線にフィッティングした修正 Voce の式のパラメータの関係を NN に学習させることで、荷重—変位曲線から流動応力曲線を推定することができる予測モデルを作成した。この予測モデルによる学習データの範囲内の引張速度となる検証用データの予測結果の精度は SS400、PP 共に十分に高く、高精度な CAE 解析に用いることができるパラメータを同定することができる予測モデルとなった。

謝辞

この研究は、2020 年度萩原科学技術振興財団の研究助成により遂行されたものです。この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Swift, H. W.: Plastic instability under plane stress, *Journal of the Mechanics and Physics of Solid*, **1**, pp.1-18(1952)
- 2) Voce, E.: The relationship between stress and strain for homogeneous deformation, *Journal of the Institute of Metal*, **74**, pp.537-562(1948)
- 3) 谷村 眞治、三村 耕司、榎田 努: 広ひずみ速度域を対象とした各種材料グループに適用し得る実用構成式、*材料*, **50**[3], pp.210-216(2001)
- 4) 安藤 大貴、蔦森 秀夫、西脇 武志、吉田 佳典、谷口 智、村田 真伸: 機械学習を援用した逆解析による切欠付丸棒引張試験の流動応力の同定、*塑性加工春季講演会 講演論文集*, pp.57-58(2022)

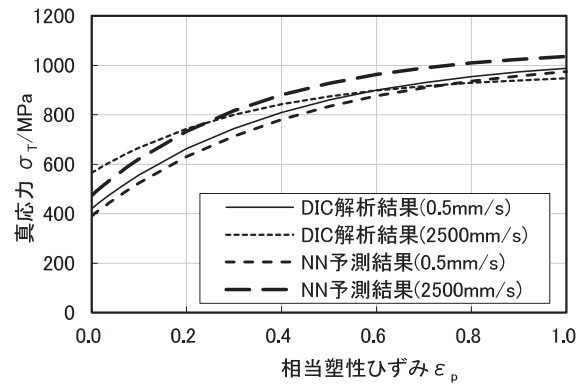


図 7 SS400 の DIC 解析及び NN 予測から得られた流動応力曲線

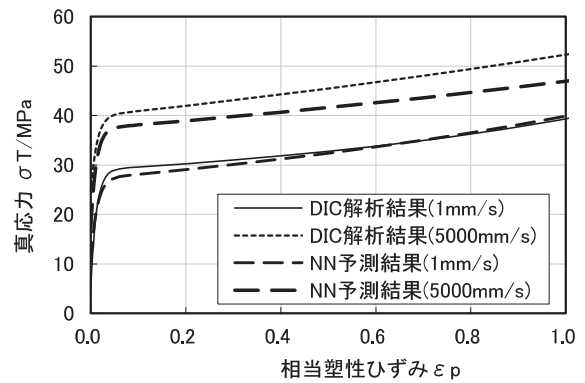


図 8 PP の DIC 解析及び NN 予測から得られた流動応力曲線

表 3 NN が予測した流動応力曲線と DIC 解析による流動応力曲線の真応力の差分の平均

材料	差分の平均 [MPa]	
	学習データ範囲内	学習データ範囲外
SS400	21.3	73.0
PP	1.7	4.6