

プレス成形シミュレーション高精度化のための 材料パラメータ決定手法開発

濱崎 洋

板材プレス金型を数値シミュレーションで設計することが当然の時代となり、プレスシミュレーションの高精度化のために応力反転時の応力・ひずみ曲線を高精度に再現しスプリングバック予測精度を向上させる吉田・上森モデルの需要が高まっている。しかし、本モデルには8つの材料パラメータがあり、これを求めるための材料試験およびパラメータ決定手法が確立していない。そこで本研究では引張圧縮試験を容易に実施できる試験治具を開発し、その実験結果から自動で吉田・上森モデルのパラメータを決定するソフトウェアを開発した。

1. はじめに

近年、自動車車体の高強度化を目的として従来の軟鋼板を高強度な高張力鋼板に置き換える動きが高まっている。この高張力鋼板はプレス成形離型時に過大なスプリングバックが生じ¹⁾、金型形状と製品形状が著しく乖離するためプレス金型の設計が困難な難成形材である。一方で、近年では金型形状やプレス工程の設計を数値シミュレーションで実施するため、シミュレーションの精度向上が求められている。このシミュレーションの精度向上には材料の応力・ひずみ挙動を精度良く表現する材料モデルが不可欠であることが知られており、特に高張力鋼板に対しては応力反転時に発現するバウシンガー効果を正確に表現できるモデルが高精度スプリングバック予測に不可欠となり、そのため、吉田・上森モデル²⁾が標準モデルとして使用されている。一方で、吉田・上森モデル中の8つの材料パラメータを決定するには引張試験に加えて引張圧縮の繰返し試験が必要であり、これらの試験から応力・ひずみ曲線を取得する必要がある。さらに、得られた応力・ひずみ曲線からパラメータの値を決定するには、複雑な数式で記述される吉田・上森モデルの知識が必要となり、プレス現場においては容易に決定できるものではない。そこで本研究では、引張圧縮試験を簡易に実施できる試験治具を作成しその有効性を検証した。さらに、得られた試験結果から自動で吉田・上森モデルの材料パラメータを決定できるソフトウェアを開発したので報告する。

2. 引張圧縮試験

2.1 引張圧縮試験治具の開発

図1に引張圧縮試験治具の外観写真を、図2に引張圧縮試験に使用した試験片の図面と写真を示す。本試験治具は既製の引張試験装置に簡単に脱着可能なものとなっている。図1に示すように台座に試験片を置き、試験片のもう一方の面には座屈防止治具をばね力で押し当てることで圧縮時の座屈を防止する。また、圧縮時には板厚増加により摩擦力の増大が懸念されるが、台座と試験片間、および座屈防止治具と試験片間にワセリンを塗布したテフロンシートを挟むことでこれを解消している。通常、板材を圧縮すると容易に座屈が生じてバウシンガー効果を観察できないことが問題で

あるが、本試験治具は圧縮時の座屈を防止しながら大きな圧縮ひずみを付与することを目的としており、これにより約±5%の繰返しひずみを加えることが目標となる。このひずみ幅で試験ができれば引張から圧縮に転じた際のバウシンガー効果だけでなく、その後の繰返し加工硬化といった吉田・上森モデルの材料パラメータを決定するために必要な情報を余すところなく簡便に取得できる。

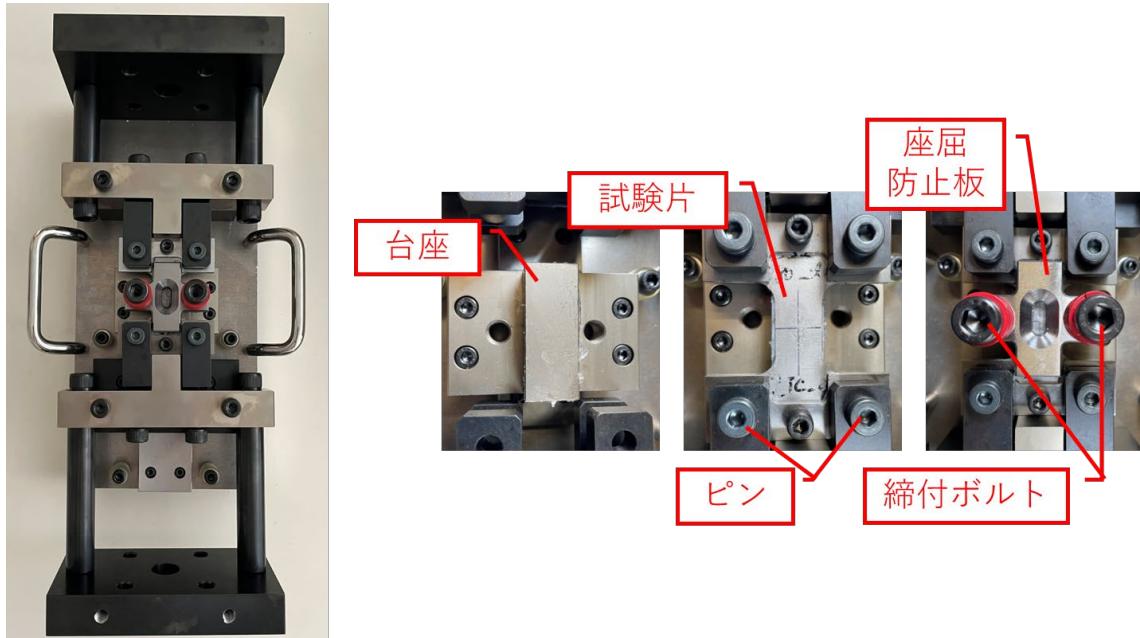


図1 引張圧縮試験治具

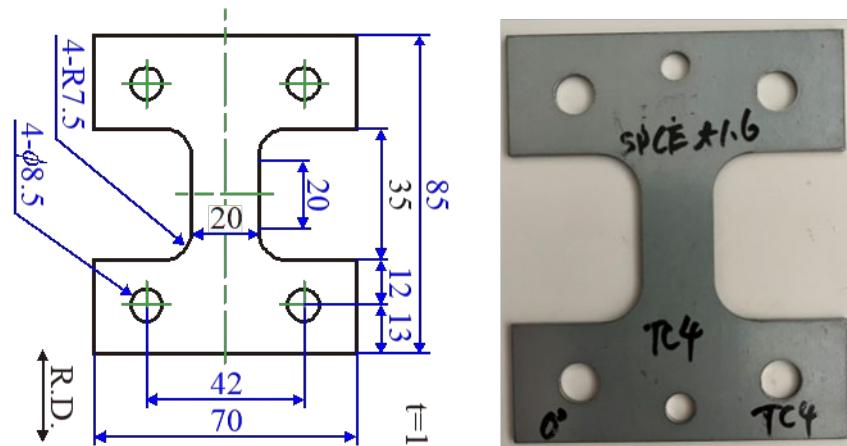


図2 引張圧縮試験片

2.2 引張圧縮試験結果

開発した引張圧縮試験治具を用いて引張圧縮試験を実施した。用いた供試材は 270 軟鋼板、780MPa 級高張力鋼板、980MPa 級高張力鋼板の 3 鋼種であり、いずれも板厚は 1mm である。試験は島津製作所製のオートグラフ（定格荷重 50kN）で実施し、ひずみは東京測器研究所製のひずみ

ゲージ (YEFCAB-2) により測定した。公称ひずみ速度は $0.001/s$ として準静的な負荷条件で試験を実施した。図 3 に試験中の外観を示す。また、JIS13B 号試験片による単軸引張試験も行った。

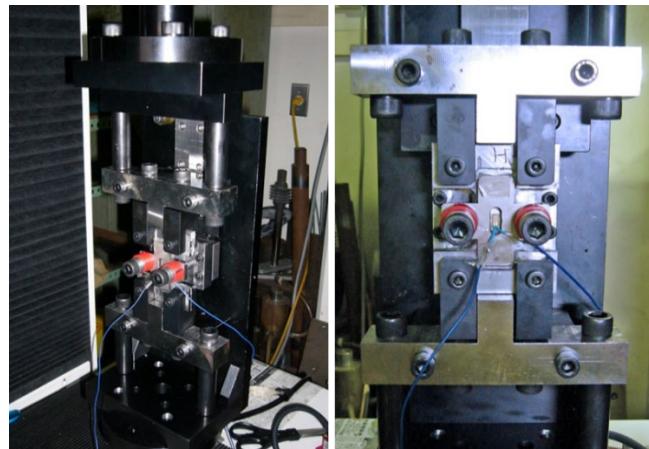


図 3 引張圧縮試験の様子

図 4 に単軸引張試験および引張圧縮試験から得られた各種鋼板の応力-ひずみ曲線を示す。270 および 780 材では引張圧縮試験において $\pm 5\%$ 以上のひずみ幅を達成できているが、980 材では最終の圧縮ひずみが 4% 程度で座屈が生じた。これは高強度な材料ほど圧縮荷重が高くなつて座屈が発生しやすいこと、それに加えて摩擦力を低減させるために大きな座屈防止荷重を加えられなかつたことが原因である。しかしながら 980 材でも応力反転時のバウシンガー効果およびその後の加工硬化特性が結果に反映されており、十分な量の圧縮ひずみを加えられたと判断できる。

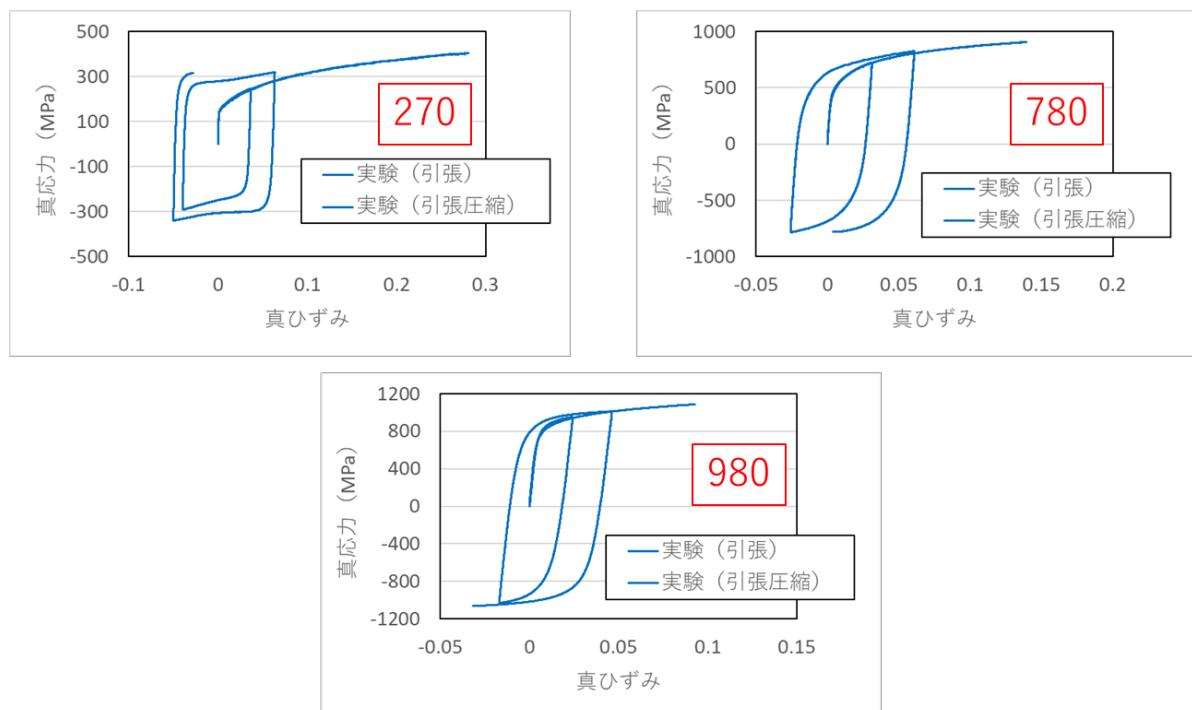


図 4 270, 780, 980 材の単軸引張試験と引張圧縮試験から得られた応力-ひずみ曲線

3. 吉田・上森モデルのパラメータ決定

3.1 最適化手法を用いたパラメータ決定の方法論

吉田・上森モデルの概要は参考文献²⁾に任せるが、前述の通り本モデルには8つの材料パラメータ(Y_0 , a_0 , C_1 , C_2 , b , m , R_{sat} , h)が含まれている。そして、プレス成形シミュレーションに先立ち、単軸引張試験と引張圧縮試験の結果からこれらの値を求める必要がある。ここでは前節で求められた応力-ひずみ曲線から自動で8つのパラメータを決定する方法論を示す。

本パラメータ決定手法では最適化手法により自動パラメータ同定を行う。ここで最適化手法とは定義した目的関数 $F_0(\mathbf{x})$ を最小化する設計変数ベクトル \mathbf{x} を決定する数学的手法である。本パラメータ決定問題において設計変数 \mathbf{x} は8つの材料パラメータである。本手法では最小二乗法により目的関数を設定する。すなわち、図5に示すように実験で得られた応力-ひずみ曲線と、与えられた材料パラメータにより計算で求められる応力-ひずみ曲線の二乗差を取る。最適化問題における最小化すべき設計変数 $F_0(\mathbf{x})$ は、単軸引張試験と引張圧縮試験の2つの結果から求められる二乗差 f_i に重み係数 w_i をかけた値の和として定義する。ここで、 $i=1$ は単軸引張、 $i=2$ は引張圧縮の結果から得られる値である。これにより本パラメータ決定における最適化問題は次式により表される。

$$\min F_0(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{ne} w_i f_i(\mathbf{x}) \quad (1)$$

$$\text{subject to } A_k \leq x_k \leq B_k, k = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$f_i(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{np_i} (l_{i,j})^2 \quad (3)$$

ここで、 ne は実験数であり今回は単軸引張と引張圧縮試験で $ne=2$ 、 A_k および B_k はそれぞれ k 番目の設計変数における探索範囲の下限値と上限値、 N は設計変数の数、 np_i は i 番目の実験における実験点の数、 $l_{i,j}$ は応力-ひずみ曲線の各点における実験と計算の差である。なお、本最適化問題は不等式制約付きの最小化問題であり、ここでは逐次二次計画法³⁾を解法として使用した。

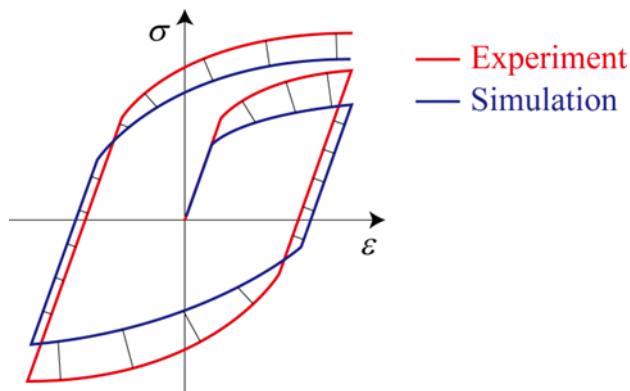


図5 実験と計算から得られる応力-ひずみ曲線の差

3.2 パラメータ同定結果

図 6 に 270, 780, 980 材に対して提案手法でパラメータ同定を実施し, 得られたパラメータの組みにて計算した応力-ひずみ曲線と実験結果の比較を示す. まず, いずれの材料でも単軸引張における実験と計算の応力-ひずみ曲線は良く一致していることが確認できる. また, 270 材では引張圧縮の応力-ひずみ曲線も両者は良く一致していることが確認できる. しかし, 780 および 980 材においては最適化結果において応力反転時の応力-ひずみ曲線をある程度表現できてはいるものの, 再降伏応力が実験よりも大きくなってしまいバウシンガー効果を正しく再現できないパラメータが求められている. 780 材では特にその傾向が強く出ており, このパラメータではスプリングバック予測を高精度に実施できないと考えられる. これは図 7 に示すように設計変数 (材料パラメータ) の変動に対して目的関数に複数の局所解を有することが原因であると考えられる. すなわち, 本問題で求めたい解は目的関数が最小となる大域的最適解であるにも関わらず, 使用した逐次二次計画法が勾配を用いて逐次的に解を探索する最適化手法であるため, 初期値近傍の局所的最適解に落ち込んだと予想される.

そこで, 各材料に対してパラメータの初期値から収束値への変化率を調査した. 例として 780 材の結果を表 1 に示す. 本表より, 多くのパラメータは最適解が初期値と異なっており, 最適化手法により適切な探索がなされている. しかし, 黄色の枠で示したパラメータ C_1 , C_2 および h は初期値からほとんど変化していない. これは先に述べた通り設定した初期値の近傍に運悪く局所的最適解が存在しており, 勾配を用いた逐次二次計画法がこの近傍の局所解を最適解として判断したためパラメータの変化率が極めて小さくなつたと考えられる. さらに, 局所的最適解の有無をあらかじめ知ることや, これを避けるべき初期値の選定は目的関数が不明のため極めて難しく, 出来るだけ大域的最適解に近づけるためには何らかの工夫が必要である.

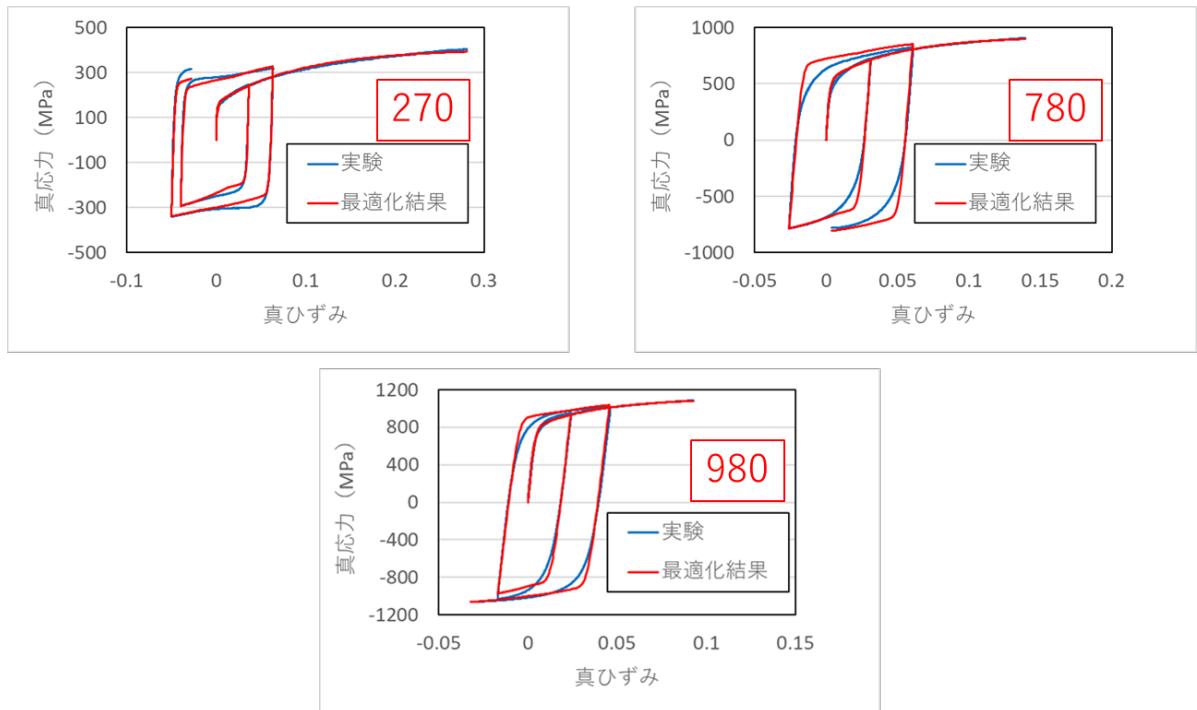


図 6 270, 780, 980 材における最適化結果と実験結果の比較

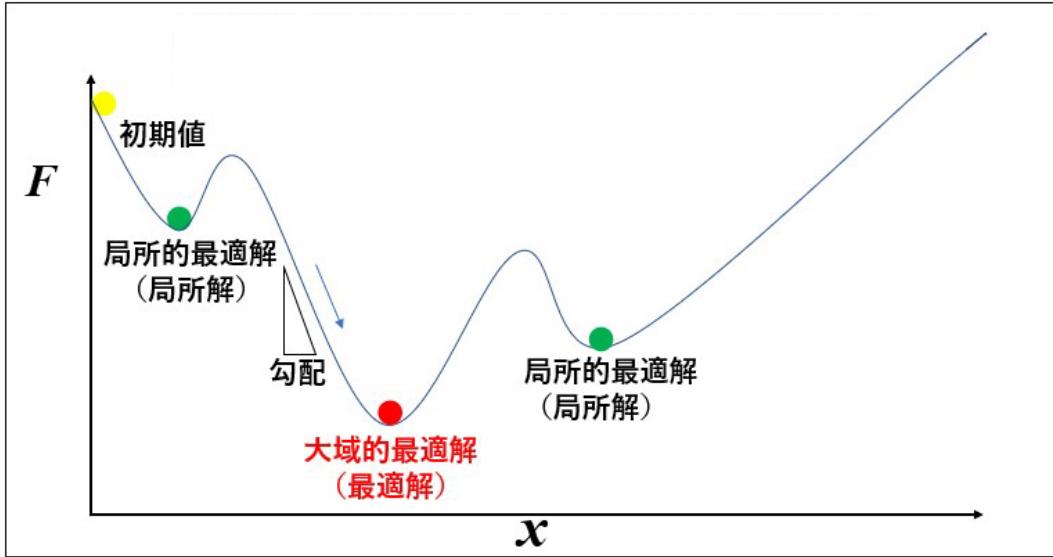


図 7 局所的最適解と大域的最適解の関係

表 1 780 材の各パラメータにおける初期値, 最適解および変化率

	初期値	最適解	変化率
Y_0 /MPa	400	342	-0.15
a_0 /MPa	265	215	-0.19
C_1	1525	1367	-0.10
C_2	1525	1528	0.0021
b /MPa	155	128	-0.18
m	27.5	21.0	-0.24
R_{sat} /MPa	325	234	-0.28
h	0.4	0.40	0.00072

3.3 パラメータ決定手法の修正

局所解への収束をできるだけ回避すべくパラメータ決定手法を修正した。本修正ではまず適当な初期値で最適化を実行してその結果から変化率の小さなパラメータを求める。続いて、これらのパラメータは局所解に収束した可能性が高いため、変化率の小さなパラメータに対して A_k , B_k で定められた設計空間全体をカバーする 20 点の初期値を作成する。そして、20 点の初期値からそれぞれ最適化を実行し、得られた 20 個の最適解のうち最も目的関数が小さな結果を真の最適解として決定するものとする。本手法は局所解への収束を完全に防止するものではないが、妥当な計算時間により良い解が得られるものと考えられる。以上の修正案の流れ図を図 8 に示す。

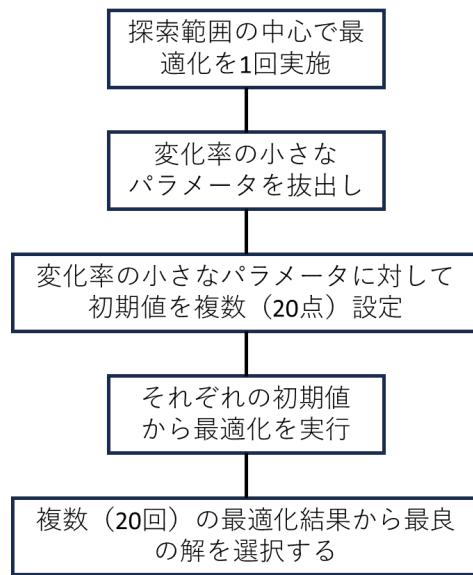


図 8 修正したパラメータ決定手法の流れ図

780 および 980 材に対して修正した最適化手法を適用した。計算により得られた応力-ひずみ曲線と実験結果の比較を図 9 に示す。本図より修正手法の結果は元の手法よりも実験結果を再現できておりその有効性が確認できる。なお、780 の引張圧縮における最後の引張において実験と計算にわずかな差が見られるが、これは引張圧縮試験でしばしば観察される引張と圧縮の非対称性によるものである。この非対称性は吉田・上森モデルでは再現できず、今回は圧縮の応力-ひずみ曲線を重視したパラメータが得られたため引張側に差が生じている。

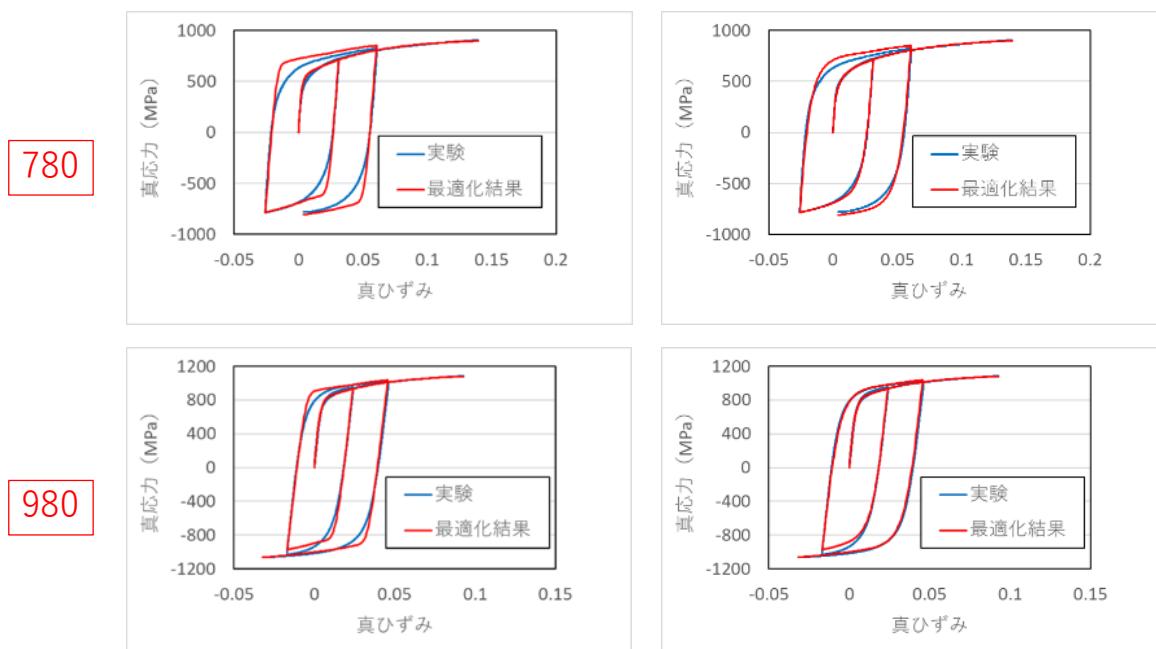


図 9 780, 980 材における修正した最適化手法により得られた結果と実験結果の比較

4. おわりに

本研究では高張力鋼板の引張圧縮試験を簡便に実施できる治具を開発した。この装置は治具と試験片の面を密着させて面圧を付与することで圧縮時の座屈を防止して大ひずみ引張圧縮試験を可能としている。続いて、270, 780, 980材に対して引張圧縮試験を実施して270, 780材では±5%以上のひずみ幅の試験が可能であることを検証した。また、980材は-4%程度の圧縮で座屈が生じたが、バウシンガー効果およびその後の繰返し加工硬化特性を把握するには十分なひずみ量であることを確認した。

続いて、引張試験と引張圧縮試験結果から吉田・上森モデルの材料パラメータを自動で決定する最適化問題を提案した。本手法では実験と計算の応力-ひずみ曲線の二乗差を最も小さくするようなパラメータを決定する最小二乗問題を最適化問題として定義した。さらに、パラメータ探索中に局所解へ陥ることをできる限り抑制する手法を提案した。本手法は複数の初期値から複数の最適化が必要であるものの計算時間は30分以内と現実的である。最後に、本手法を270, 780, 980材に適用して、提案手法が吉田・上森モデルのパラメータを高精度に決定できることを示した。

参考文献

- 1) K. Lawanwong, H. Hamasaki, R. Hino, F. Yoshida, Effect of Counter Punch Pressure on Springback of High Strength Steel Sheet, *Advanced Materials Research*, Vol. 939 (2014) pp. 305-312.
- 2) Fusahito Yoshida and Takeshi Uemori: A model of large-strain cyclic plasticity for sheet metals describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation, *International Journal of Plasticity*, 18 (2002), pp.661-686.
- 3) M. J. D. Powell, A fast Algorithm for Nonlinear Constrained Optimization Calculations, *Lecture Notes in Mathematics*, Vol. 630, Springer, Berlin (1978), pp. 144-157.