

形状記憶合金の機械的特性モデル化 (研究報告)

2002年8月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

形状記憶合金の機械的特性モデル化

(研究報告)

和田 学*¹, 井出雄介*², 溝手信一郎*², 直井 久*³
月森和之*⁴

要 旨

核燃料サイクル開発機構では、高速炉炉心の安全性・経済性を追求する観点より、炉心の変形挙動を詳細に把握するための解析手法の開発を進めている。この開発プロセスにおいては、炉内実験では十分なデータが得られない為、炉外において集合体モデルを形状記憶合金で作成し、その形状回復機能を使って集合体湾曲挙動を表現することにより、炉心全体としての挙動を模擬する方法を考案した。本研究では、この試験方法を実現するために必要な形状記憶合金の熱的・機械的挙動の把握、およびこれに基づく数学的モデル化について検討を行った。

本研究の供試材には近年開発された 28%Mn-6%Si-5%Cr-Fe の鉄系形状記憶合金を用い、鉄系形状記憶合金の変形特性に及ぼす熱的・機械的負荷や加工ひずみや応力の影響などを材料試験により把握し、数値解析に展開するために有効なモデル式の構築とその妥当性の検証を行った。

この結果、今回の研究でモデル化した鉄系形状記憶合金の機械的特性を用いて、縮尺された簡単な燃料集合体模擬試験体の3点曲げ変形挙動を推定できる可能性を得た。

* 1 法政大学工学研究科機械工学専攻博士課程

* 2 (元) 法政大学工学研究科機械工学専攻修士課程

* 3 法政大学工学部機械工学科

* 4 サイクル機構 訴訟対策室, (兼務) 大洗工学センター 要素技術開発部

**MODELING OF MECHANICAL PROPERTIES
FOR FERROUS SHAPE MEMORY ALLOY**

**Manabu WADA *1, Yusuke IDE *2, Shinichiro MIZOTE *2 and Hisashi NAOI *3
Kazuyuki TSUKIMORI *4**

Abstract

In order to acquire technical data that are necessary for manufacture and design of the simulation test device for analyzing the core mechanics of Fast Breeder Reactor, ferrous shape memory alloy of Fe-28%Mn-6%Si-5%Cr is melted, forged and heat-treated. The microstructures are austenite. The specimens are deformed of up to 16% work-strain by tensile and compressive test, resulting in appearance of epsilon-martensite that is induced by stress. Then, heating at 673K for 10 minutes causes austenitic transformation from epsilon-martensite and shape memory strains are measured. We also investigate shape memory character of specimens, which are given, so called 'training treatment' of 5% pre-strain and recovery heat treatment. As a result, there is little difference between tensile and compressive test without training treatment and shape memory strain is 2% after being given 5% work-strain and recovery heat treatment. On the other hand, training treatment is remarkable and shape memory strain reaches to 3.7% after 5% work-strain. We analyze shape recovery character of this alloy specimen at three-point bending by using finite element method, and indicate possibility that its deformation behavior can be estimated from mechanical properties' data obtained at tensile and compressive test.

*1 Graduate of Doctor Course, Department of Mechanical Engineering,
Division of Engineering, The University of Hosei.

*2 Graduate of Master Course, Department of Mechanical Engineering,
Division of Engineering, The University of Hosei.

*3 Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, The University of Hosei.

*4 Litigation Support Office, Administration & Site Planning Division
/ Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC.

目次

1	緒言	1
1.1	研究の目的	1
1.2	研究の概要	1
2	研究に用いた鉄系形状記憶合金	3
2.1	形状記憶合金の比較・選択	3
2.2	鉄系形状記憶効果の発現機構	3
2.3	組成元素の役割	4
2.4	トレーニング効果	5
2.5	試験材料	5
3	基本特性試験	6
3.1	単軸引張特性	6
3.1.1	試験片	6
3.1.2	試験方法	6
3.1.3	試験結果	7
3.2	単軸圧縮特性	8
3.3	高温引張特性	9
3.3.1	試験片	9
3.3.2	試験方法	9
3.3.3	試験結果	10
3.4	弾性係数	11
3.4.1	試験片	11
3.4.2	測定方法	11
3.4.3	試験結果	12
3.5	線膨張率	13
3.5.1	試験片	13
3.5.2	測定方法	13
3.5.3	試験結果	13
3.6	断面組織	14
3.6.1	試験方法	15
3.6.2	試験結果	16
4	形状記憶特性試験	25
4.1	単軸引張による基本記憶特性	25
4.1.1	試験方法	25
4.1.2	試験結果	25
4.2	単軸圧縮による基本記憶特性	27
4.2.1	試験片座屈の検討	27
	(1) 高温引張試験片Ⅱ-6形における圧縮試験時の座屈	27
	(2) 圧縮試験片による座屈	27
4.2.2	試験方法	28
4.2.3	試験結果	28
4.3	トレーニング材の記憶特性	31
4.3.1	試験方法	31
4.3.2	試験結果	31
4.3.3	トレーニングの効果	33
4.4	定応力下の記憶特性	34
4.4.1	単軸引張定応力下の記憶特性	34
	(1) 試験方法	34
	(2) 試験結果	34

4. 4. 2	単軸圧縮定応力下の記憶特性	41
(1)	単軸圧縮加工ひずみを付与した場合の単軸圧縮定応力下の記憶特性	41
(2)	単軸引張加工ひずみを付与した場合の単軸圧縮定応力下の記憶特性	48
4. 4. 3	応力の影響	53
(1)	引張加工ひずみを付与する場合における引張定応力と圧縮定応力の影響	53
(2)	圧縮加工ひずみを付与する場合における圧縮定応力の影響	53
5	数値解析のための機械的特性のモデル化	55
5. 1	考慮すべき因子	55
5. 2	炉心変形模擬試験での試験体の変形挙動	55
5. 3	材料特性のモデル化	56
5. 3. 1	初期形状設定過程	56
(1)	トレーニング効果考慮を考慮した加工ひずみ ϵ_w と回復ひずみ ϵ_m の関係	57
(2)	温度とひずみ(回復分)の関係	59
(3)	応力の影響	60
5. 3. 3	構成式	61
5. 3. 4	実験より得られたモデル式	61
6	機械的特性モデルの検証	63
6. 1	矩形断面梁の4点曲げ試験	63
6. 1. 1	試験方法	63
6. 1. 2	FEM 解析方法	65
6. 1. 3	試験結果	66
6. 2	燃料集合体模擬試験体の3点曲げ試験	72
6. 2. 1	燃料集合体模擬試験体の製作	72
(1)	ラッパ管の製作	74
(2)	ノズルの製作	75
(3)	パッド部の製作	75
6. 2. 2	試験方法	76
(1)	弧状管の製作	76
(2)	直線化加工による加工ひずみの付与	78
(3)	形状回復処理	80
(4)	測定	81
6. 2. 3	試験結果	81
(1)	弧状管の曲げ加工	81
(2)	形状回復特性	81
6. 2. 4	数値解析	83
6. 2. 5	形状記憶特性	84
7	結言	87
	参考文献	88
	本研究に関する研究講演	88
	付録1 ひずみ分布の計算式	89
	付録2 形状記憶合金を利用したピンバンドル・ダクト接触時の燃料集合体曲げ剛性の評価	90

Table 1-1	List of experimental procedure.....	2
Table 2-1	Comparisons of various shape memory alloys.....	3
Table 2-2	Chemical compositions of test specimens (wt%, N:ppm).....	5
Table 3-1	Dimensions of test specimen and uniaxial tensile properties at room temperature for FSMA.....	8
Table 3-2	Dimensions and tensile properties at elevated temperature for FSMA.....	10
Table 3-3	Elastic modulus of FSMA	12
Table 4-1	Shape memory characteristic of FSMA on uniaxial tension.....	26
Table 4-2	Shape memory characteristic of FSMA by uniaxial compressive test.....	29
Table 4-3	Shape memory characteristic of FSMA with training processing on uniaxial tension	32
Table 4-4	Results of tensile constant stress test after tensile work strain applied	34
Table 4-5	Results of compressive constant stress test after compressive work strain applied	42
Table 4-6	Results of compressive constant stress test after tensile work strain applied	49
Table 6-1	Dimensions of wrapper tube (mm)	74
Table 6-2	Deflection of specimens at each step of 3-point bending.....	78
Table 6-3	Deflection of specimen at each step of linearization processing	79

Fig. 1-1	Model of core deformation behavior test by shape memory alloy	1
Fig. 2-1	Concept of phase transformation from a viewpoint of free energy	4
Fig. 2-2	Model of martensitic transformation	4
Fig. 3-1	Test specimen for elevated temperature tensile test	6
Fig. 3-2	Tensile properties of FSMA which was as hot rolled and heat treated.....	8
Fig. 3-3	Tensile properties of FSMA at elevated temperatures.....	11
Fig. 3-4	Young's modulus, modulus of rigidity and Poisson's ratio of FSMA	12
Fig. 3-5	Coefficient of linear expansion and dilatation of FSMA	13
Fig. 3-6	Coefficient of linear expansion of FSMA (3 ϕ \times 10mm)	14
Fig. 3-7	Dimension of tensile test specimen for microstructural observation.....	14
Fig. 3-8	Tensile test device for microstructural observation	14
Fig. 3-9	Stress-strain diagram of FSMA at elastic region.....	18
Fig. 4-1	Effects of work strain on shape recovery strain of FSMA without training treatment	27
Fig. 4-2	Effects of work strain on shape recovery strain of FSMA at compressive test.....	30
Fig. 4-3	Effects of tensile and compressive work strain on shape recovery strain for FSMA without training treatment	30
Fig. 4-4	Effect of work strain on shape recovery strain of FSMA with training treatment	33
Fig. 4-5	Comparison between with and without training treatment on shape recovery strain	33
Fig. 4-6	Effects of tensile work strain and tensile constant stress on shape recovery strain...35	
Fig. 4-7	Stress-strain-temperature diagram at 0 MPa tensile constant stress test for FSMA with 3% tensile work strain.....	36
Fig. 4-8	Stress-strain-temperature diagram at 140 MPa tensile constant stress test for FSMA with 3% tensile work strain.....	36
Fig. 4-9	Stress-strain-temperature diagram at 300 MPa tensile constant stress test for FSMA with 3% tensile work strain.....	37
Fig. 4-10	Stress-strain-temperature diagram at 0 MPa tensile constant stress test for FSMA with 5% tensile work strain.....	38
Fig. 4-11	Stress-strain-temperature diagram at 140 MPa tensile constant stress test for FSMA with 5% tensile work strain.....	38
Fig. 4-12	Stress-strain-temperature diagram at 300 MPa tensile constant stress test for FSMA with 5% tensile work strain.....	39
Fig. 4-13	Stress-strain-temperature diagram at 0 MPa tensile constant stress test for FSMA with 10% tensile work strain.....	40
Fig. 4-14	Stress-strain-temperature diagram at 140 MPa tensile constant stress test for FSMA with 10% tensile work strain.....	40
Fig. 4-15	Stress-strain-temperature diagram at 300 MPa tensile constant stress test for FSMA with 10% tensile work strain.....	41
Fig. 4-16	Effects of compressive work strain and constant compressive stress on shape recovery strain.....	42
Fig. 4-17	Stress-strain-temperature diagram at 0 MPa compressive constant stress test for FSMA with 3% compressive work strain	43
Fig. 4-18	Stress-strain-temperature diagram at 141MPa compressive constant stress test for FSMA with 3% compressive work strain	44
Fig. 4-19	Stress-strain-temperature diagram at 354MPa compressive constant stress test for FSMA with 3% compressive work strain	44
Fig. 4-20	Stress-strain-temperature diagram at 0 MPa compressive constant stress test for FSMA with 5% compressive work strain	45
Fig. 4-21	Stress-strain-temperature diagram at 141MPa compressive constant stress test for FSMA with 5% compressive work strain	45
Fig. 4-22	Stress-strain-temperature diagram at 354MPa compressive constant stress test for	

	FSMA with 5% compressive work strain	46
Fig. 4-23	Stress-strain-temperature diagram at 0 MPa compressive constant stress test for FSMA with 10% compressive work strain	46
Fig. 4-24	Stress-strain-temperature diagram at 141MPa compressive constant stress test for FSMA with 10% compressive work strain	47
Fig. 4-25	Stress-strain-temperature diagram at 354MPa compressive constant stress test for FSMA with 10% compressive work strain	47
Fig. 4-26	Effects of tensile work strain and constant compressive stress on shape recovery memory strain	49
Fig. 4-27	Stress-strain-temperature diagram at 70MPa compressive constant stress test for FSMA with 3% work strain.....	50
Fig. 4-28	Stress-strain-temperature diagram at 140MPa compressive constant stress test for FSMA which was given 3% work strain.....	51
Fig. 4-29	Stress-strain-temperature diagram at 70MPa compressive constant stress test for FSMA which was given 5% work strain.....	51
Fig. 4-30	Stress-strain-temperature diagram at 140MPa compressive constant stress test for FSMA which was given 5% work strain.....	52
Fig. 4-31	Stress-strain-temperature diagram at 70MPa ompressive constant stress test for FSMA which was given 10% work strain.....	52
Fig. 4-32	Stress-strain-temperature diagram at 140MPa constant compressive stress test for FSMA which was given 5% work strain.....	53
Fig. 4-33	Relation between work strain, applied constant stress and shape recovery factor ..	54
Fig. 5-1	Initial Configuration Forming Process	56
Fig. 5-2	Shape Recovery Process.....	57
Fig. 5-3	Relation between Work strain and Recovery strain.....	58
Fig. 5-4	Relation between Work Strain and Recovery Ratio.....	59
Fig. 5-5	Relation between Temperature and Recovery Strain	59
Fig. 5-6	Concept of Stress Effect on A_s and A_f	60
Fig. 5-7	Effect of Stress on Recovery Strain.....	60
Fig. 5-8	Relation between Stress and Recovery Strain	61
Fig. 5-9	Recovery characteristics of FSMA without training treatment obtained by experimentand calculation by model formula.....	62
Fig. 5-10	Recovery characteristics of FSMA with training treatment obtained by experimentand calculation by model formula.....	62
Fig. 6-1	FEM model of four-point bending	65
Fig. 6-2	Distributions of work strain and radius of curvature at 4-point bending	67
Fig. 6-3	Strain distributions of four-points bending at 4 % work strain	68
Fig. 6-4	Strain distributions of four-points bending at 6 % work strain	69
Fig. 6-5	Strain distributions of four-points bending at 8 % work strain	69
Fig. 6-6	Strain distributions of four-points bending at 12 % work strain	70
Fig. 6-7	Relationship between shape recovery strain ϵ_m , ϵ_{bm} and work strain ϵ_m	71
Fig. 6-9	Manufacturing and test procedure of deformation simulator of subassembly	72
Fig. 6-10	Drawing of deformation simulator of subassembly.....	73
Fig. 6-11	Cross section and welding position of wrapper tube	75
Fig. 6-12	Experimental instrument for 3-point bending of deformation simulator of subassembly	77
Fig. 6-13	Deflection of specimens at each step of 3-point bending.....	78
Fig. 6-14	Deflection of specimen at each step of linearization processing.....	79
Fig. 6-15	Displacement of specimen at the point of 632 mm distance from crump tool by shape recovery effect.....	82
Fig. 6-16	Work strain vs. recovery strain of deformation simulator of subassembly.....	82
Fig. 6-17	FEM model of 3-point bending for deformation simulator of subassembly	83
Fig. 6-18	X-axis strain distribution at 3-point bending caluculated by FEM analysis.....	84
Fig. 6-19	Displacement distribution of experiment and FEM analysis after 3-point bending.....	85

Fig. 6-20 Displacement distribution of experiment and FEM analysis after shape recover treatment.....85

Fig. 6-21 Relation between work strain recovery strain at at tensile test and 3-point bending86

写真目次

Photo 3-1	INSTRON type tensile test machine	7
Photo 3-2	Compressive test machine.....	9
Photo 3-3	View of polishing process for tensile test specimen	15
Photo 3-4	View of corrosion process for tensile test specimen	16
Photo 3-5	Microstructure of FSMA as manufactured and after 5% work strain	17
Photo 3-6	Microstructure of FSMA on loading at 0 % work strain and 0 MPa stress	19
Photo 3-7	Microstructure of FSMA on loading at 0.04 % work strain and 55 MPa stress	20
Photo 3-8	Microstructure of FSMA on loading at 0.06 % work strain and 96 MPa stress	21
Photo 3-9	Microstructure of FSMA after loading at 0.08 % work strain and 125 MPa stress	22
Photo 3-10	Microstructure of FSMA after loading at 0.09 % work strain and 140 MPa stress	23
Photo 3-11	Microstructure of FSMA after loading at 0.1 % work strain and 155MPa stress ..	24
Photo 6-1	Experimental instrument for 4-point bending	63
Photo 6-2	Scriber	64
Photo 6-3	Scotch tape removed from specimen.....	64
Photo 6-4	Deformed specimen of four-point bending.....	65
Photo 6-5	Wrapper tube(SMA), pad(SMA) and nozzle(SUS316).....	75
Photo 6-6	Wrapper tube after 3-point bending.....	78
Photo 6-7	View of specimen after shape recovery treatment	79
Photo 6-8	View of linearization processing.....	80
Photo 6-9	View of shape recovery processing	81

記号表

A	断面積 (m ²)
A _s	オーステナイト変態開始温度 (°C)
A _f	オーステナイト変態終了温度 (°C)
c	弦の長さ (m)
D	直径 (m)
D1, D2, D3	長さ (m)
f	振動数 (Hz)
E	ヤング率 (MPa または N/mm ²)
G	横弾性係数 (GPa または N/mm ²)
GL	標点距離 (m)
h	高さ (m)
M _s	マルテンサイト変態開始温度 (°C)
M _f	マルテンサイト変態終了温度 (°C)
m	ポアソン数
n	座屈の端面拘束条件
I	慣性モーメント (kg·m ²)
k	断面二次半径 (m)
L	長さ (m)
P	荷重 (N)
P _k	座屈荷重 (N)
PL	試験片平行部距離 (m)
T	温度 (°C)
T _a	初期温度 (°C)
T _b	昇温過程の最終温度 (°C)
TS	引張強さ (MPa または N/mm ²)
T·El	全伸び (%)
t	厚さ (m)
w	幅 (m)
YS	0.2%耐力 (MPa または N/mm ²)
YS _t	0.2%耐力・真ひずみ表示 (MPa または N/mm ²)
α	線膨張率 (°C ⁻¹)
ε	ひずみ (%)
ε _w	加工ひずみ (%)
ε _{wmax}	最大加工ひずみ (%)
ε _m	形状回復ひずみ (%)
ε _{bm}	曲げ戻しによる梁の曲げ外周面における形状回復ひずみ (%)
ε _e	ひずみの弾性成分
ε _p	塑性に見立てた超弾性ひずみの非線形成分
ε _θ	温度を変化させる時点で生じるひずみ成分
ε _{m0}	トレーニング無しの形状回復ひずみ (%)
ε _{m01}	トレーニング有りの形状回復ひずみ (%)
η	形状回復率 (ε _m /ε _w)
ν	ポアソン比
ρ	曲率半径 (m)
ρ _D	密度 (kg/m ³)
σ	応力 (MPa または N/mm ²)
σ _k	座屈応力 (MPa または N/mm ²)
ω	角振動数 (rad/s)

1 緒言

1.1 研究の目的

核燃料サイクル開発機構では、高速炉炉心の安全性・経済性を追求する観点より、炉心の変形挙動を詳細に把握するための解析手法の開発を進めている^{1,2)}。この開発プロセスにおいては、実験によって解析手法の妥当性を個別あるいは総合的に検証する必要があるが、炉内実験では十分なデータが得られないため、炉外において効率の良い試験を実施することが要求される。そこで炉外における試験方法として、集合体モデルを形状記憶合金で作成し、その形状回復機能を使って集合体湾曲挙動を表現することにより、炉心全体としての挙動を模擬する方法が考案された⁹⁾。

炉内に設けられた構造部材は Fig. 1-1 に示すように温度分布に伴う圧縮、引張、曲げ等の変形が複雑な変形挙動を呈するため炉心状態を推定することは難度が高い。そこで従来から炉内を模擬したモデルを考案し炉心状況を推測する研究が進められてきているが、考案した方法は予め温度分布による部材の変形を予測して、その変形を鉄系形状記憶合金に形状記憶させ、均一温度下で形状回復させる模擬試験装置により炉心の変形状態を明らかにすることである。

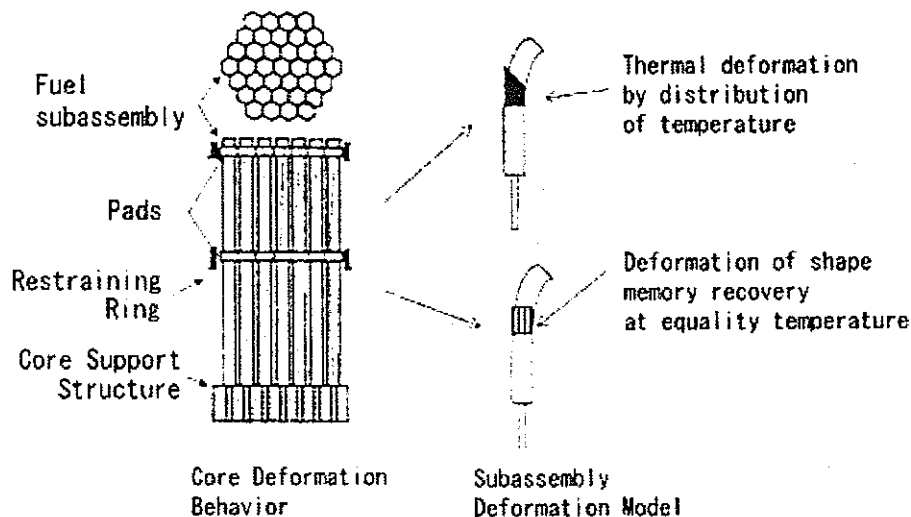


Fig. 1-1 Model of core deformation behavior test by shape memory alloy
形状記憶合金による炉心変形挙動モデル

本研究は、形状記憶合金を利用した炉心変形模擬試験方法を実現するために必要となる形状記憶合金の機械的特性に関する基礎的研究である。具体的な研究内容は、加工性の良好な鉄系形状記憶合金をターゲットとして変形特性に関する熱的、機械的荷重の影響、また加工の影響などを材料試験により把握し、数値解析へ展開するために有効な構成式を構築することである。

1.2 研究の概要

本研究は、形状記憶合金を利用した炉心変形模擬試験方法の確立についての見通しを得ることを目的とする。研究は以下の5段階に分けられる。

- (1) 材料の基本特性、形状記憶特性および数値解析のための構成モデル検討
基本特性とは、温度依存性を含めた機械的特性、熱膨張特性等の物理的特性を示す。
 - (2) 材料の加工性に関して、切削・塑性加工・溶接性等問題の検討
 - (3) 炉心変形模擬試験体の仕様検討・試作
 - (4) 炉心変形模擬試験体の基本試験、解析との照合、計測（ひずみ、荷重、変位等）
 - (5) まとめ(形状記憶合金による試験方法の体系化)～アナロジー解析による評価、実現象の予測
- 研究の展開としては、当初は基礎工学的内容を吟味し、その後に解析・評価といった応用工学的内容へと比重を移す。なお、本研究における材料試験等の内訳を Table 1-1 に示す。

Table 1-1 List of experimental procedure
材料試験一覧

材料試験名称	試験項目	試験材料	試験片
1. 基本特性試験	(1) 単軸引張特性	0.2%耐力, 引張強さ, 全伸び	HEAT A 576 高温引張試験片Ⅱ-6形
	(2) 単軸圧縮特性	記憶特性に及ぼす単軸圧縮加工ひずみの基本調査	HEAT A 576 圧縮試験片 8Φ×12L
	(3) 高温引張特性	0.2%耐力, 引張強さ, 全伸び	HEAT A 576 高温引張試験片Ⅱ-6形
	(4) 弾性係数	ヤング率, 横弾性係数, ポアソン比	HEAT A 576 板状試験片 1t×10w×60L
	(5) 線膨張率	加熱・冷却時の線膨張率	HEAT A 576 線膨張率測定試験片 10Φ×50L
	(6) 断面組織	断面組織変化に及ぼす加工ひずみの影響	HEAT A 576 線膨張率測定試験片 3Φ×10L
2. 形状記憶特性試験	(1) 単軸引張による基本記憶特性	記憶特性に及ぼす単軸引張加工ひずみの影響調査	HEAT A 576 高温引張試験片Ⅱ-6形
	(2) 単軸圧縮による基本記憶特性	記憶特性に及ぼす単軸圧縮加工ひずみの影響調査	HEAT A 576 圧縮試験片 8Φ×12L
	(3) トレーニング材の記憶特性	記憶特性に及ぼすトレーニング処理の影響調査	HEAT A 576 高温引張試験片Ⅱ-6形
	(4) 定応力下の記憶特性	① 単軸引張定応力	記憶特性に及ぼす単軸引張応力の影響調査
② 単軸圧縮定応力		記憶特性に及ぼす単軸圧縮応力の影響調査	HEAT A 576 圧縮試験片 8Φ×12L
3. 機械的特性モデルの検証	(1) 矩形断面梁の4点曲げ試験	記憶特性に及ぼす4点曲げのひずみ影響評価	HEAT A 576 曲げ試験片 10t×20w×230L
	(2) 燃料集合体模擬試験体の3点曲げ試験	燃料集合体模擬試験体による記憶特性調査	HEAT No.8 燃料集合体模擬試験体

2 研究に用いた鉄系形状記憶合金

2.1 形状記憶合金の比較・選択

本研究に用いる形状記憶合金を選択するため、既存の TiNi 合金、銅系合金、鉄系合金について比較検討し、その結果を Table 2-1 に示した。TiNi 合金は形状回復ひずみが最大 8% と大きめで、形状記憶処理が比較的容易であるが、加工性は劣り、価格が高位である。銅系合金は比較的安価であるが、繰り返し寿命が低めであり、形状記憶処理が難しい。鉄系合金は形状回復ひずみが TiNi 合金に比べて低めであり、開発されたばかりで繰り返し寿命のデータは無いが、加工性が最も良く、かつ価格が低廉である。以上の総合評価から本研究に用いる形状記憶合金としては鉄系形状記憶合金を用いることとした。

Table 2-1 Comparisons of various shape memory alloys
各種形状記憶合金の比較

項目	項目	TiNi 合金	銅系合金	鉄系合金
形状回復特性	形状回復ひずみ	*最大 8%	*最大 4%	最大 4%
	形状回復応力	*最大 400MPa	*最大 400MPa	最大 200MPa
使用性能	繰り返し寿命	* 10^5 (ひずみ 0.02) * 10^7 (ひずみ 0.005)	* 10^2 (ひずみ 0.02) * 10^5 (ひずみ 0.005)	不明
	耐食性	*良い	*問題あり (応力腐食割れ)	比較的良い
	加工性	*良くない	*あまり良くない	良い
形状記憶処理	形状記憶処理	*比較的容易	*かなり難しい	容易
	変態温度	80°C以下	100°C以下	約 300°C
	変態時の温度に対する変形率	大	大	緩やか
価格	相対価格 (TiNi を 1)	1	およそ 10 分の 1	およそ 20 分の 1

出典：*印は船久保照康編，形状記憶合金，産業図書（1984）10)

2.2 鉄系形状記憶効果の発現機構

鉄系形状記憶合金の形状記憶効果は、オーステナイト相 γ (fcc 構造) から ϵ マルテンサイト相 (hcp 構造) への応力誘起マルテンサイト変態を利用したものである (5,6,7)。高温で安定なオーステナイト相を急冷するとその途中である温度を通過する時に相変態が起こり、 ϵ マルテンサイト相に変わる。Fig. 2-1 においてオーステナイト相とマルテンサイト相における変態の概念を示すが、 T_0 は両相の化学的自由エネルギーが等しくなる温度で、この温度以上でオーステナイト相が安定であり、この温度以下でマルテンサイト相が安定となる。 $M_s < T < T_0$ の温度領域では、熱力学的にはマルテンサイト相の安定領域だが変態に必要な自由エネルギー ΔG が不足するため、実際にはオーステナイト相が存在する。よって変態の駆動力分の自由エネルギー ΔG に達するまで過冷却されて M_s まで温度が降下した時、マルテンサイト変態が生じる事となる (4,8)。しかしながら $M_s < T < T_0$ の温度領域ではせん断変形を誘起させるような応力をあたえると準安定のオーステナイト相からマルテンサイト相が生じる。これを応力誘起マルテンサイト変態と呼ぶ。通常、金属を変形させるとすべりが生じるが、応力誘起マルテンサイト変態により、Fig. 2-2 のようにすべりが生じる (この場合、オーステナイト相は相変態を起こさず元のままである) 代わりに格子が傾くことで変形が進む。マルテンサイト相はすべり変形と異なり原子の隣接関係は保たれたままで、 A_s 点以上の温度では不安定となり元のオーステナイト相に変態する。

従来の鉄系形状記憶合金の応力誘起マルテンサイト変態温度は常温より低かったので形状記憶特性の工学的利用に不利であったが、最近の研究により応力誘起マルテンサイト変態温度は常温近傍まで上昇すると共に加工性に優れた鉄系形状記憶合金が開発されている (3,6,7)。

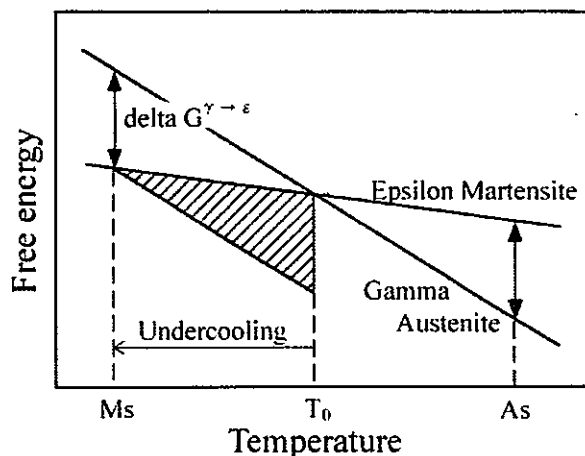


Fig. 2-1 Concept of phase-transformation from a viewpoint of free energy
自由エネルギーからの相変態概念

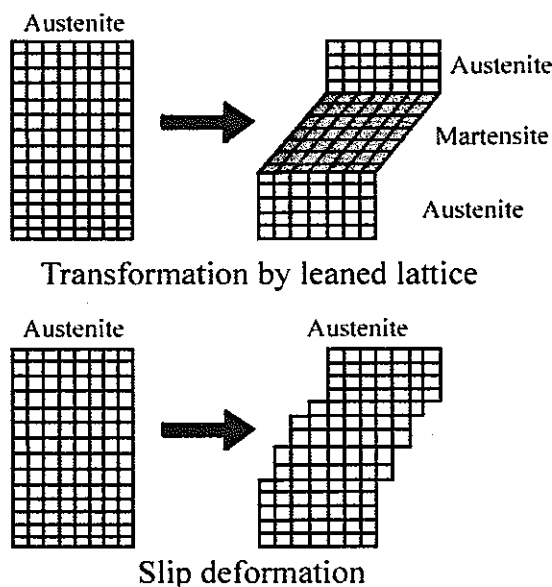


Fig. 2-2 Model of martensitic transformation
マルテンサイト変態のモデル

2.3 組成元素の役割

本研究で使用した鉄系形状記憶合金（英語では Ferrous Shape Memory Alloy, 以下略して FSMA と呼ぶ）の主要組成は Mn28wt% - Si6wt% - Cr5wt% - Fe 合金であり、以下に本合金化学成分の役割について述べる 5)。

Mn 含有量が増えると M_s 温度が下降するが、30wt%の付近まで Mn 含有量を増加すると M_s 点消失する。その消失の理由は Mn 量の増加でネール温度が上昇するため、温度が低下してもマルテンサイト相とのエネルギー差が変態の駆動力に達せずマルテンサイト変態が起こらなくなるためである。

Si はそのネール温度を低下させる働きがあるため 6wt% 添加している。Si の添加は M_s 温度にあまり影響を与えない。この効果が室温変形での応力誘起のマルテンサイト変態を利用した形状記憶効果を実現させている。また、Si の効果はネール温度の低下だけでなく母相の強度を上昇させることなので、変形時の転移の導入が妨げられ応力誘起マルテンサイト変態がすべり変形に対し優先的に起こるため形状記憶効果が向上する。

Cr は、Fe・Mn・Si の 3 元合金が耐食性の面で極めて悪く、その改善のため添加する必要がある。また Cr はネール点及び M_s 点の観点から見ても悪影響は及ぼさず、形状記憶効果にも優れているこ

とから、実用的な観点からは耐食性の点で Cr の添加は必須と考えられ 5wt% 添加した。

2. 4 トレーニング効果

鉄系形状記憶合金には変形と加熱変態を何度か繰り返すとマルテンサイト相を低応力で生成でき、またすべり変形を抑制するため、形状記憶効果が飛躍的に上昇する現象があり、トレーニング効果と呼ばれている³⁾。トレーニング効果は、本 Fe-Mn-Si-Cr 系合金において非常に特徴的な性質である。トレーニング効果の発現機構は以下の2通りのメカニズムが考えられている。第1に、一度マルテンサイト変態した後、加熱処理を行ってオーステナイト相に逆変態した後も、積層欠陥としてマルテンサイト相が残存している。次の変態の際にその積層欠陥を起点としてマルテンサイト変態が起こるため、変態に必要な応力が少なくすむ。また第2に、繰り返し加工による転位の導入によりマトリクスが強化され、次の変形の際の新たな転位の導入を抑制するためすべり変形が生じにくい。

トレーニング回数が增加するほど形状記憶効果が大きくなるが、1回目のトレーニング効果は大きい、2回以上では効果が飽和してくることが明らかにされている。このことから、本研究ではトレーニング処理を1回とする。またその時に付与するひずみ量は5%とした。この理由は、本研究に使用する鉄系形状記憶合金の応力誘起マルテンサイトの量は約30%に過ぎず、それゆえ過大なひずみを与えると負荷時にすべり変形を起こす。そのため、出来る限り大きな予ひずみを与えたいが、すべり変形を少しでも抑えるという相反する目的を達成させるよう、単軸引張り試験結果において形状回復ひずみが飽和し始める点であり、最も高い形状回復ひずみを示した5%とした。

2. 5 試験材料

試験材料には近年開発された 28%Mn-6%Si-5%Cr-Fe の鉄系形状記憶合金(英文では FSMA と呼ぶ)を用いている。これを鍛造後 1150°C に加熱・圧延し、950°C で1時間熱処理しオーステナイト相としたものを試験片とする。このときマルテンサイト変態開始温度 M_s は 50°C 以下で応力誘起マルテンサイト変態温度は常温近傍にあり、オーステナイト変態終了温度 A_r は 130°C 程度以上である。試験片の化学組成を Table 2-2 に示す。

本研究における試験材は、100kgW/新報国製鉄 HEAT A 576 を溶解・ casting し、鍛造ののちに 50kgW×2 体に切断したものを用いた。その後、鍛造・1150°C での熱間圧延と熱処理 950°C×1h を施した丸棒 13φ×L、および熱間圧延と熱処理 950°C×1h を施した板材 12t×250W×L に加工している。

なお6. 2節に示す燃料集合体模擬試験体では、試験材に HEAT No.8 の板材 (0.8mm 厚) を用いている。

Table 2-2 Chemical compositions of test specimens (wt%, N:ppm)
試験材の化学組成 (wt%, N:ppm)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	
Targets	<i>Min</i>	0.000	5.60	27.50	0.000	0.000	0.00	4.50	0
	<i>Max</i>	0.060	6.40	28.50	0.020	0.015	0.75	5.50	160
HEAT A 576	0.013	5.99	28.35	0.007	0.007	0.04	4.99	156	
HEAT No.8	0.006	6.13	27.6	<0.005	0.007	0.012	5.21	24	

3 基本特性試験

基本特性試験は単軸引張試験，単軸圧縮試験，高温引張試験と，弾性係数，線膨張率の測定，断面組織調査，組織変化に及ぼす加工ひずみの影響調査から構成されている。

3.1 単軸引張特性

単軸引張試験により加工ひずみを与えることで応力誘起マルテンサイト変態を発生させ，その後熱処理によりオーステナイト相への逆変態させることにより形状記憶特性を調査した。調査内容は，0.2%耐力（公称応力・真応力），引張強さ，全伸び，破断位置，S-S 曲線である。

3.1.1 試験片

試験片として2.5節の材料より作成した丸棒の熱延・熱処理材を用いることとし，JIS Z 2271で規定された直径6mmの丸棒高温引張試験片(II-6形)を3本製作した。Fig. 3-1に試験片の模式図を示す。

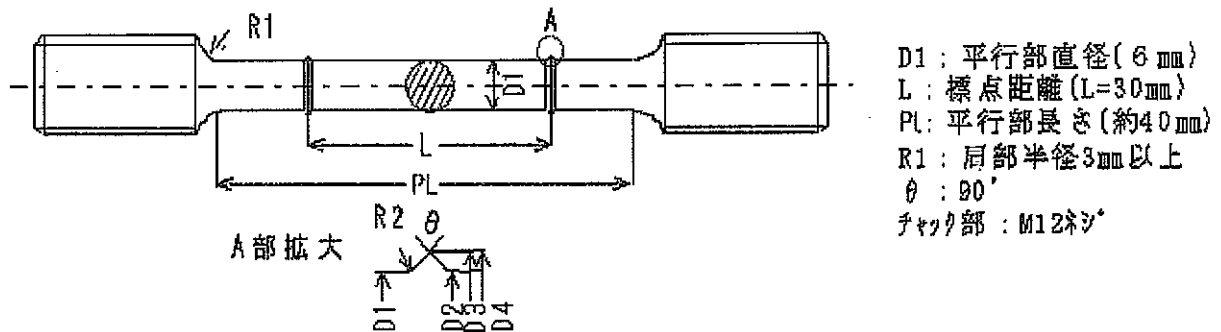


Fig. 3-1 Test specimen for elevated temperature tensile test
 高温引張試験片

3.1.2 試験方法

荷重容量100kNのインストロン型引張試験機を用いて，JIS G 0567で規定され方法で単軸引張試験を行った。試験温度は常温およびクロスヘッドの移動速度は，0.2%耐力までは0.1mm/min(ひずみ速度= 5×10^{-5} /s)，0.2%耐力を超え破断までは2mm/min(ひずみ速度= 1.0×10^{-3} /s)とした。試験に用いたインストロン型引張試験機をPhoto 3-1に示す。

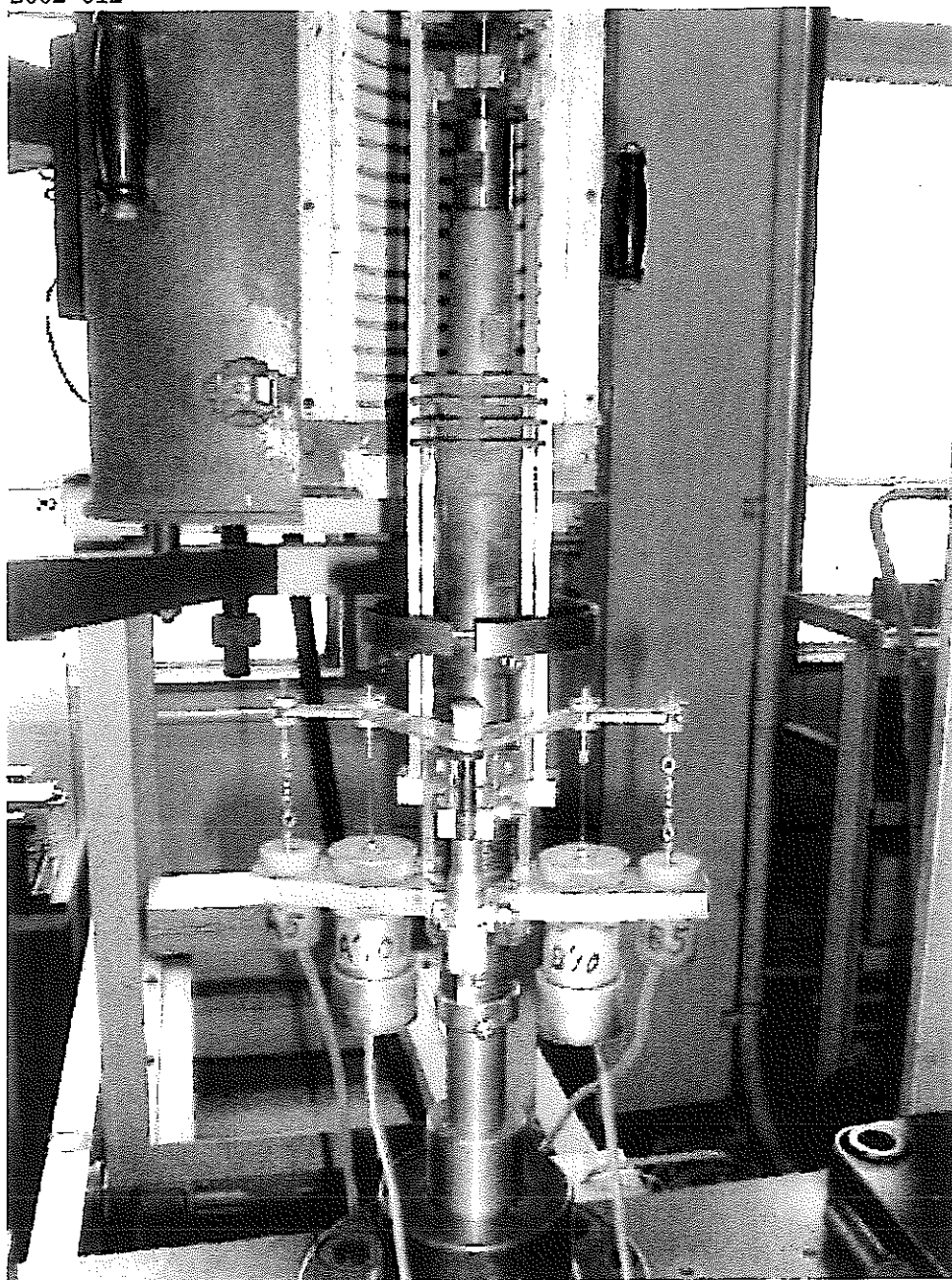


Photo 3-1 INSTRON type tensile test machine
インストロン型引張試験機

3. 1. 3 試験結果

Table 3-1 および Fig. 3-2 に、試験結果として鉄系形状記憶合金の単軸引張特性を示す。鉄系形状記憶合金の常温における引張特性(3本平均)は、0.2%耐力で約 272MPa、引張強さは約 815MPa および全伸びで約 38%である。ただし、2本目の材料は引張強さが 792MPa でやや低く、全伸びが約 30%で他の2本に比べて 10~15%低い。

Table 3-1 Dimensions of test specimen and uniaxial tensile properties at room temperature for FSMA

鉄系形状記憶合金の試験片寸法と常温単軸引張試験特性

初期寸法				引張特性値						
試験材 番号	初期径 d(mm)	断面積 A(mm ²)	標点距離 GL(mm)	0.2%耐力(YS)			引張強さ(TS)		全伸び (公称) (%)	破断位置 (A, B, C区分)
				荷重 (N)	公称応力 (MPa)	真応力 (MPa)	荷重 (N)	公称応力 (MPa)		
14	6.00	28.26	30.081	7660	271	272	23000	814	45.2	B
15	6.01	28.35	30.072	7740	273	274	22450	792	30.2	B
16	6.02	28.45	30.062	7660	269	270	23880	839	40.3	B

注) 試験条件: JIS Z 2241の方法による

(1) 試験機: インストロン型引張試験機(島津製作所製/オートグラフ IS-10T, 荷重容量100kN)

(2) 0.2%耐力: クロスヘッド移動速度=0.1 mm/min(=5×10⁻⁵/s)で測定

(3) 耐力を超え破断まではクロスヘッド移動速度=2mm/min(=2×10⁻⁴/s)で測定

(4) 破断位置: 標点間を4等分し、下記の位置で破断区分した

A: 標点の中心から±25%以内で破断

B: 標点の中心から±25%超~標点内で破断

C: 標点外で破断

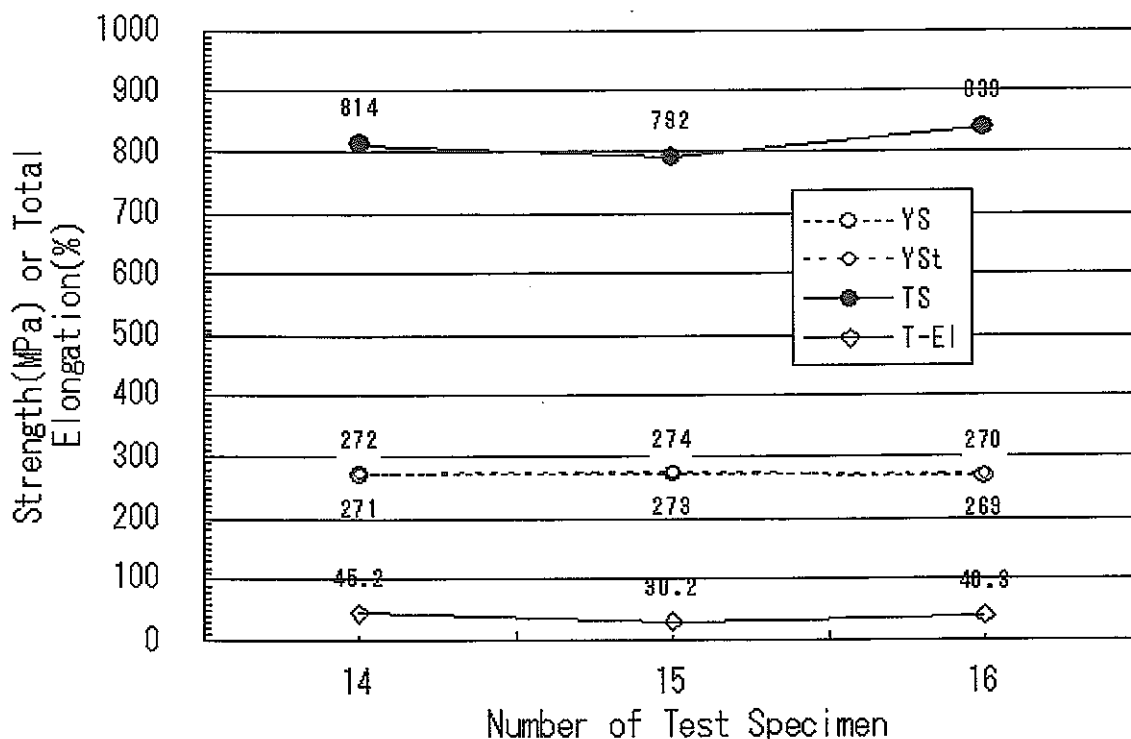


Fig. 3-2 Tensile properties of FSMA which was as hot rolled and heat treated
鉄系形状記憶合金の単純引張特性 (トレーニング処理なし・常温)

3. 2 単軸圧縮特性

単軸圧縮試験により加工ひずみを与えて応力誘起マルテンサイト変態を発生させ、その後熱処理によりオーステナイト相への逆変態を施すことで形状記憶特性を調査した。

この試験では、2. 5節に示す材料で作成した丸棒の熱延・熱処理材より円柱形状の圧縮試験片 8 φ × 12L を作成し、圧縮試験機を用いて圧縮試験を行った。

試験の詳細と結果は4. 2節「単軸圧縮による基本記憶特性」で述べる。

試験に用いた圧縮試験機を Photo 3-2 に示す。

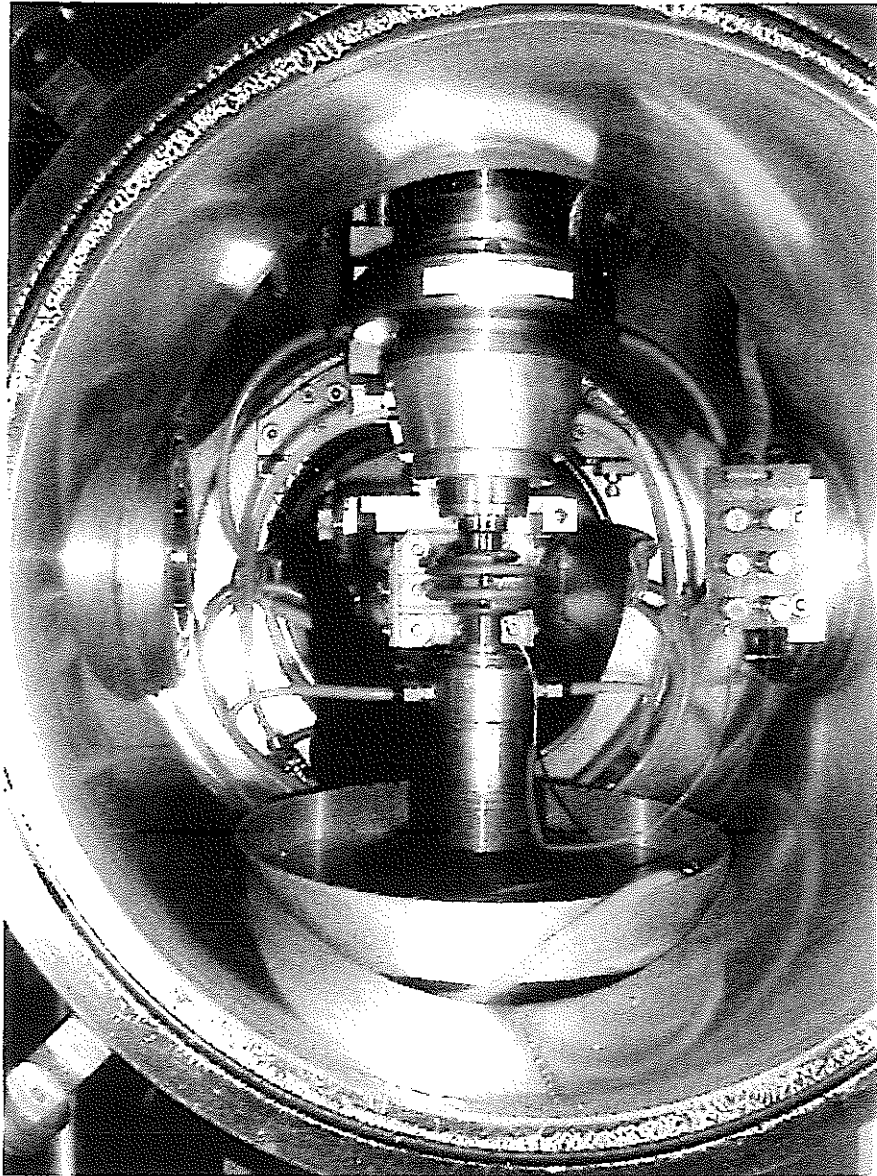


Photo 3-2 Compressive test machine
圧縮試験機

3. 3 高温引張特性

材料の高温下における引張特性を把握するため、高温引張試験を行った。試験温度は8水準の50,100,150,200,250,300,350,400℃とし、0.2%耐力(公称応力, 真応力),引張強さ,全伸び,破断位置,S-S曲線について調査を行った。

3. 3. 1 試験片

Fig. 3-1 に示した高温引張試験片Ⅱ-6形を8本製作した。

3. 3. 2 試験方法

引張試験片を、縦型加熱炉付属のインストロン型高温引張試験機に付属した加熱炉に取り付け、加熱炉で50,100,150,200,250,300,350および400℃の各温度に加熱し、15分間保持の後に引張試験を行った。ここで加熱時の試験片の熱膨張による応力の発生を回避するため、引張試験開始直前までの間は上部の固定治具を解除した状態で加熱した。またクロスヘッドの移動速度は、試験開始から0.2%耐力までは0.1mm/min(ひずみ速度= 5×10^{-3} /s), 0.2%耐力を超え破断までは2mm/min(ひずみ速度= 1.0×10^{-3} /s)とした。

3. 3. 3 試験結果

Table 3-2 および Fig. 3-3 に試験結果を示す。

0.2%耐力は、試験温度が50℃および100℃材の0.2%耐力は271および272MPaで、常温試験材の値とほぼ同等である。また150~250℃では、試験温度上昇が上昇するにしたがって0.2%耐力がなだらかに減少し、150℃材で230MPa、200℃材で185MPaおよび250℃材で162MPaまで低下する。250~400℃間では、試験温度の上昇による耐力の低下量が小さく、300℃材で156MPa、350℃材で150MPa、および400℃材で152MPaである。

引張強さは、試験温度が上昇するにしたがってほぼ単調に減少し、50℃で777MPa、100℃で735MPa、150℃で701MPa、200℃で637MPa、250で613MPa、300℃で594MPa、350℃で569MPaおよび400℃で553MPaを示し、150~200℃間での強度の低下がやや大きいようである。全伸びは、試験温度が上昇するにしたがって全伸びが増加する。ここで、200℃以下における全伸びの増加率は200℃以上の場合に比べてやや大きく、100℃で約49%、200℃で約58%、300℃で約62%および400℃で約64%である。

破断位置は、全数B破断となっている。ただしツバから約10mmの位置で破断しているものが多く、標点距離の初期値で判定すればA破断となるが、全伸びが44~65%と大きいため破断後材の位置で判定している。

Table 3-2 Dimensions and tensile properties at elevated temperature for FSMA
鉄系形状記憶合金の基本特性(高温引張特性)

試験材 番号	初期寸法			試験 温度 (℃)	高温引張特性				
	初期径 d (mm)	断面積 A (mm ²)	標点距離 GL (mm)		0.2%耐力(YS)		引張強さ(TS)	全伸び	破断位置
					公称応力 (MPa)	実応力 (MPa)	公称応力 (MPa)	T-EI (%)	(A,B,C区分)
17	6.02	28.45	30.044	50	271	271	777	48.8	B
18	6.02	28.45	30.065	100	272	273	735	48.9	B
19	6.00	28.26	30.064	150	230	230	701	53.7	B
20	6.01	28.35	30.075	200	185	186	637	57.9	B
21	6.02	28.45	30.091	250	162	162	613	60.0	B
22	6.01	28.35	30.055	300	156	156	594	61.8	B
23	6.02	28.45	30.080	350	150	151	569	64.5	B
24	6.00	28.26	30.033	400	158	158	553	64.5	B

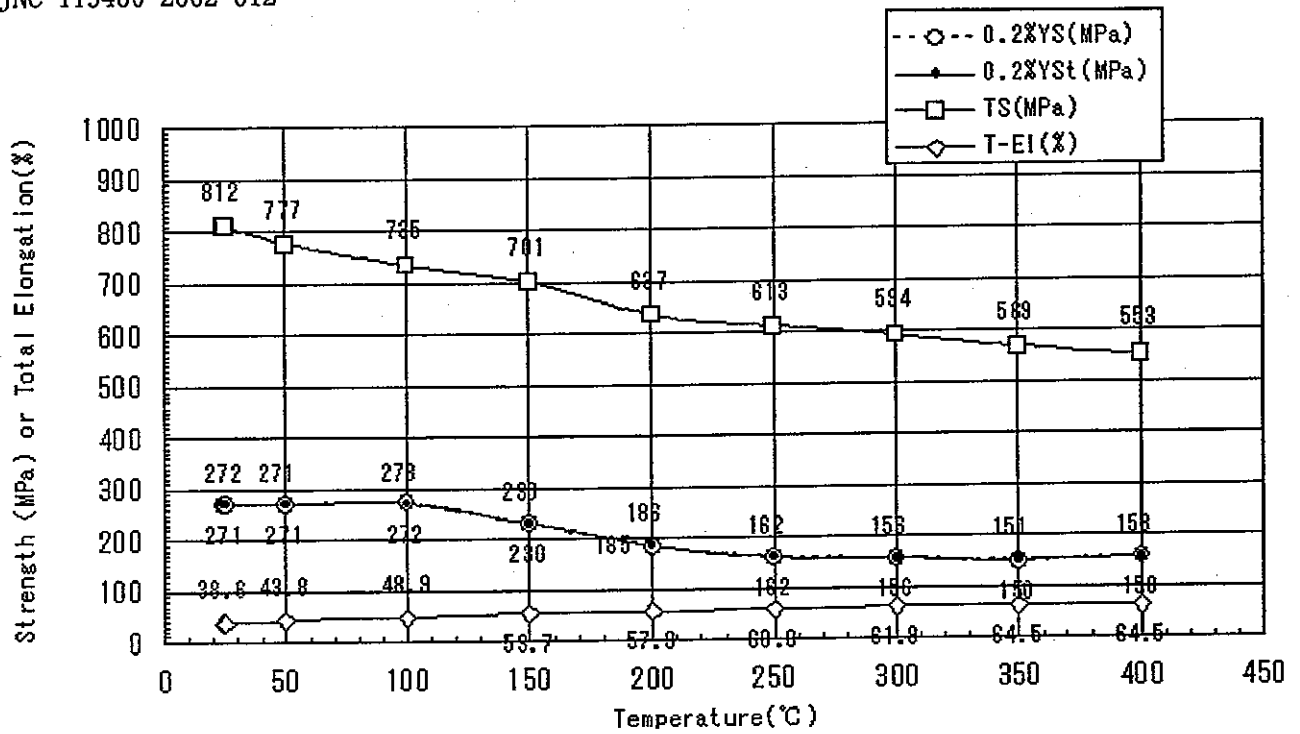


Fig. 3-3 Tensile properties of FSMA at elevated temperatures
鉄系形状記憶合金の高温引張特性

3. 4 弾性係数

3. 4. 1 試験片

機械加工によるひずみを回避するため、放電加工法を用いて熱延板・熱処理材から板状試験片を製作した。ここで、加工ひずみが0%材では板厚1mm、幅10mm、長さ60mmの板状試験片を、5%加工ひずみ材では板厚1mm、幅20mm、長さ約200mmの板状試験片を用いて、平行部の幅12.5mm、平行部の長さ60mmのJIS 13B号板状引張試験片を製作した。これを引張試験機にて5%のひずみを付加後、除荷した試験片の平行部から長さ60mmに放電加工して測定に供した。

3. 4. 2 測定方法

高温弾性率同時測定装置 (EG12, 日本テクノプラス株式会社) を用いて、変態加工ひずみ(以下「加工ひずみ」と記す)0%および5%材の常温および300°Cにおけるヤング率および横弾性係数を、横振動・ねじり振動解析法により測定した。また、ポアソン比はヤング率と横弾性係数から計算で求めた。なおヤング率E, 横弾性係数G, ポアソン比νは、以下の(3.1)～(3.3)式により算出している。

$$E = \frac{\omega^2 \rho_D LA}{I\lambda^2} \quad (3.1)$$

$$G = K \frac{Lf^2}{(1-aT/w)wt^2} \quad (3.2)$$

$$\nu = 1/m = \frac{E}{2G} - 1 \quad (3.3)$$

但し、 E : ヤング率 ω : 角振動数 ρ_D : 密度 L : 長さ A : 断面積
 I : 慣性モーメント λ : 試料と駆動部の重さに起因する無次元変数
 G : 横弾性係数 K : 装置定数 f : 振動数 a : 定数 t : 厚み
 w : 幅 ν : ポアソン比 m : ポアソン数

3. 4. 3 試験結果

Table 3-3 および Fig. 3-4 に鉄系形状記憶合金のヤング率等の測定結果を示す。

加工ひずみ 0 %材(熱延・熱処理材)について、常温におけるヤング率Eは 169GPa, 横弾性係数Gは 62.3GPa およびポアソン比 ν は 0.36 であった。また 300℃でのヤング率Eは 153.5GPa, 横弾性係数Gは 56.3GPa で、常温での値に比べて約 10%小さい。またポアソン比 ν は 0.36 で常温と同じである。

加工ひずみ 5 %材については、常温におけるヤング率Eは 175GPa, 横弾性係数Gは 68.2GPa およびポアソン比 ν は 0.28 である。一方、300℃におけるヤング率Eは 167.6GPa, 横弾性係数Gは 61.2GPa およびポアソン比 ν は 0.37 である。

これによれば、加工ひずみ 5 %材は 0 %材に比べて、常温でのヤング率および横弾性係数がやや大きい、ポアソン比はやや小さい。また 300℃でのヤング率および横弾性係数がやや大きく、加工ひずみ 0 %材の常温での値とほぼ同等の値である。

なお加工ひずみ 5 %材は、300℃までの加熱途中の約 200℃で試験片が変形し測定困難となったため、ここでいったん冷却し、その後 300℃まで再加熱して測定した。前記の加熱途中の変形は、試験材の形状記憶現象にともなう測定中の変形によるものと推察される。

Table 3-3 Elastic modulus of FSMA
鉄系形状記憶合金の弾性係数

試験材 No	加工ひずみ (%)	測定温度 (°C)	ヤング率 E (GPa)	横弾性係数 G (GPa)	ポアソン比 ν
59	0	常温	169.2	62.3	0.359
		300	153.5	56.3	0.363
60	5	常温	175.0	68.2	0.283
		300	167.3	61.2	0.367

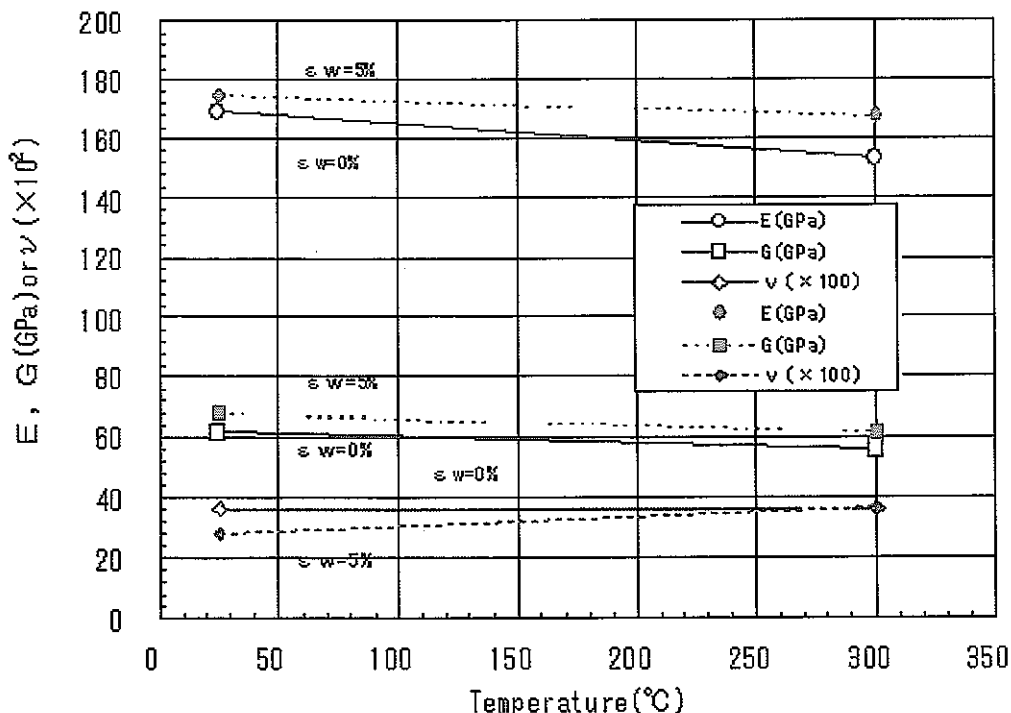


Fig. 3-4 Young's modulus, modulus of rigidity and Poisson's ratio of FSMA
鉄系形状記憶合金のヤング率・横弾性係数

3.5 線膨張率

3.5.1 試験片

2.5節に示す材料の熱延・熱処理鋼板から、直径10mm×長さ50mmおよび直径3mm×長さ10mmの線膨張率測定試験片を各1本製作し、これを測定した。

3.5.2 測定方法

線膨張率は、加熱時の熱膨張による試験片の長さ変化を差動トランスの変位として検出し、計測した。

直径10mmの試験片については、常温から加熱速度0.1°C/sで650°Cまで加熱した際の加熱時の線膨張率を測定した。また直径3mmの試験片については、常温から700°Cまで加熱速度0.08°C/sにて加熱の後、700°Cで300s保持し、冷却速度0.04°C/sで冷却した際の加熱中および冷却中の線膨張率を測定した。

3.5.3 試験結果

直径10mmの試験片を加熱した際の線膨張率測定結果をFig. 3-5に示す。また直径3mmの試験片を加熱および冷却した際の線膨張率測定結果をFig. 3-6に示す。

結果より加熱時の線膨張率は、常温から約400°Cまでの間では線膨張率の温度依存性が認められた。常温から約150°Cまでの間の熱膨張率は約 $12\sim 15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、150°C以上の温度域で $15\sim 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ で、高温域のほうが温度依存性は小さくなっている。加熱時の線膨張率は、試験材 $10\phi \times 50\text{L}(\text{mm})$ 材のほうが $3\phi \times 10\text{L}(\text{mm})$ 材に比べてやや大きいようである。

冷却時の線膨張率は、700°Cで5min間保定後、常温付近まで冷却した際に、700°Cから450°Cの間では約 $20\sim 23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。なおバラツキはやや大きい、測定温度が低くなるに従って線膨張率がわずかに小さくなる傾向が認められる。400°Cから50°Cの間では約 $19\sim 17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ で、わずかに減少する傾向となっているが、温度依存性は小さい。

また加熱時に認められた400°C以下での線膨張率の温度依存性は、試験片加工時の加工ひずみが影響しているものと推察される。

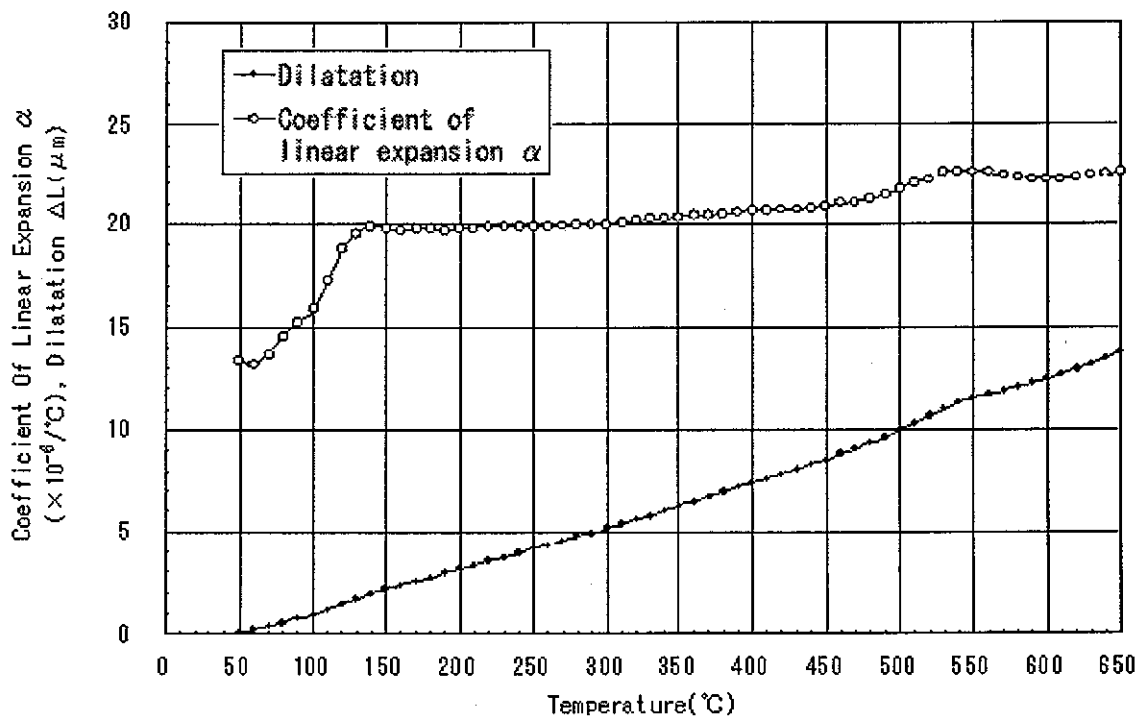


Fig. 3-5 Coefficient of linear expansion and dilatation of FSMA
鉄系形状記憶合金の線膨張率

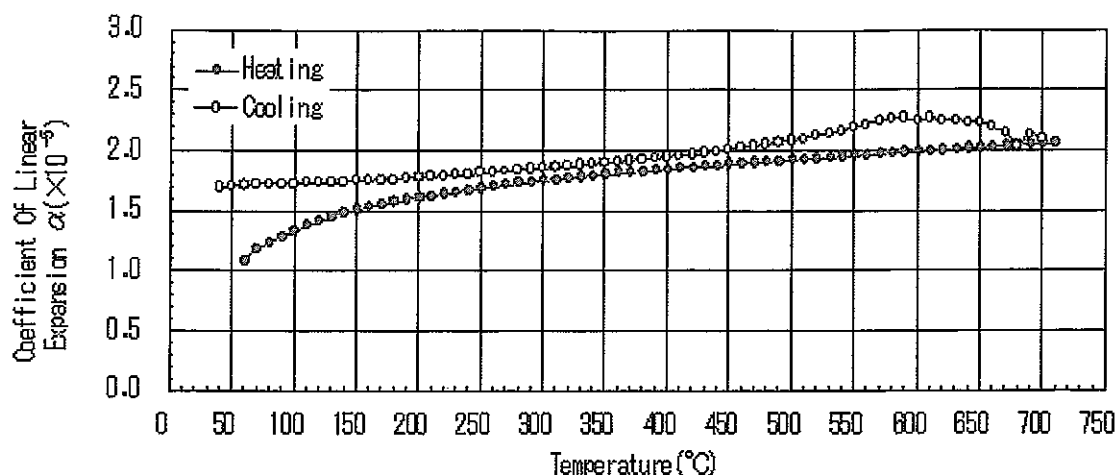


Fig. 3-6 Coefficient of linear expansion of FSMA ($3\phi \times 10\text{mm}$)
鉄系形状記憶合金の線膨張率 ($3\phi \times 10\text{L}$ 材)

3. 6 断面組織

鉄系形状記憶合金の圧延・熱処理材（バージン材）と5%加工材について、それぞれのL断面を光学顕微鏡により100, 200, 500倍で断面観察した。また弾性範囲内での応力負荷状態の加工材についても、同様に断面を光学顕微鏡により観察した。観察時に用いた試験片をFig. 3-7に、治具をFig. 3-8に示す。

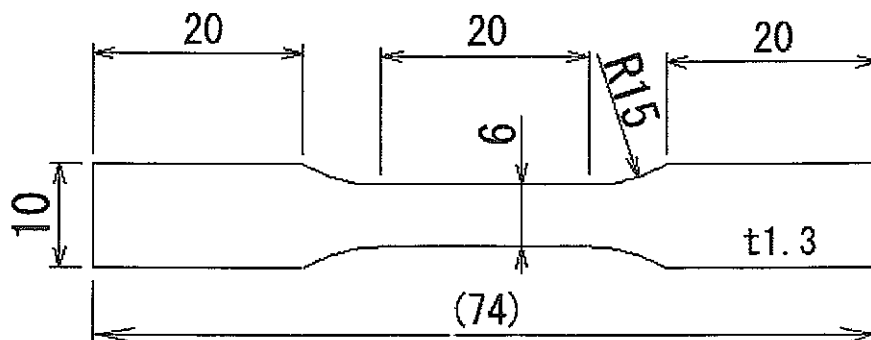


Fig. 3-7 Dimension of tensile test specimen for microstructural observation
断面組織観察用引張試験片

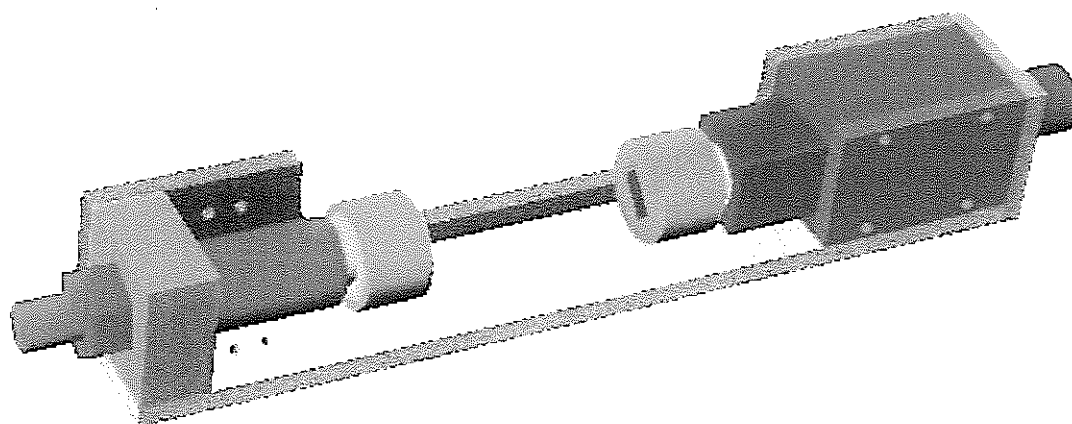


Fig. 3-8 Tensile test device for microstructural observation
断面組織観察用引張試験装置

3. 6. 1 試験方法

機械研磨は Photo 3-3 に示す回転板の研磨機において、エメリー紙を用いて研磨する。エメリー紙は#400 より#1000, さらに#1500 へと徐々に細かくしてゆき、交換する際は水洗・アルコール洗浄・ブローによる乾燥を必ず行う。

十分な機械研磨が行われたのち、 $6\mu\text{m}$ ダイヤモンド砥粒にてダイヤモンド研磨を行い、表面を鏡面状態とする。研磨の際にはオイル潤滑を用い、発熱を抑えるようにする。今回使用した研磨砥粒は Struers 社製の DP-spray である。この後にさらに $1\mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒にて研磨を行う。研磨工程ののち、間をおかずに 1 回目のエッチングを行う。使用したエッチング液は(35~37%塩酸：60~61%硝酸：エタノール)を(1：1：3)で混ぜたもので 60sec 攪拌しながら Photo 3-4 に示すとおりドラフター内にて作業を行う。60 秒後にすぐ水洗し、アルコール洗浄と乾燥を行ってから硝酸による酸化を防ぐ。

エッチングを確認したのち、面を整えるために $0.04\mu\text{m}$ コロイダルシリカによる研磨を行う。続いて再度エッチングを行う。通常、2 回目以降は組織が出るのに時間がかかるため、エッチング時間を少しずつ延ばしていくが、今回は 80~90sec とした。

その後裏面にひずみゲージを貼り、動ひずみ測定器にてひずみの値を測定し、その断面状態を光学顕微鏡にて撮影した。用いたひずみゲージは型番 KFG-5-120-C1- 11L3M2R, 動ひずみ測定器には共和電業の DPM-400B を使用した。



Photo 3-3 View of polishing process for tensile test specimen
引張試験片の研磨工程状況



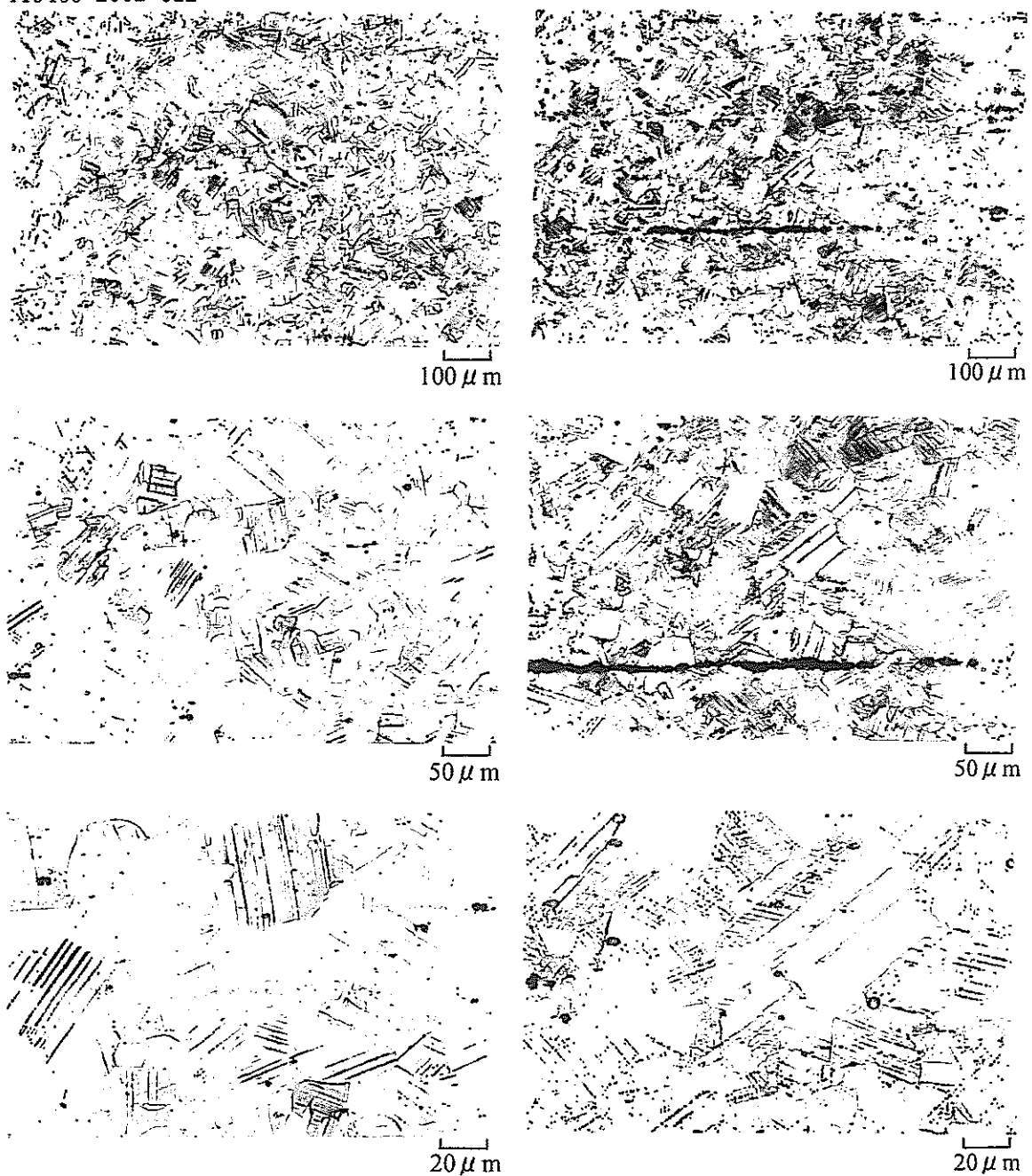
Photo 3-4 View of corrosion process for tensile test specimen
引張試験片の腐食工程状況

3. 6. 2 試験結果

圧延熱処理を行ったバージン材と5%ひずみを与え除荷した加工材の断面組織写真を、それぞれ Photo 3-5(a)及び Photo 3-5 (b)に示す。図は上から100倍、200倍、500倍で写真の横方向に引張りを行ったものである。

5%加工の組織にははっきりとした双晶が見られ、その結晶方位は60度の角を成しており正三角形形状に3方向であるので、 ϵ マルテンサイト相であることが確認された。一方、バージン材にも少量の双晶が見られ、 ϵ マルテンサイト相が微量散在するが、主体はオーステナイト組織である。

バージン材に散在する微量の ϵ マルテンサイト相が存在する理由は、組織写真を撮影するために試験片を加工する際、加工による応力誘起マルテンサイトが試験片表面に出現したためであると考えている。



(a) Microstructure of as manufactured (b) Microstructure after 5% work strain

Photo 3-5 Microstructure of FSMA as manufactured and after 5% work strain
鉄系形状記憶合金のバージン材と5%ひずみ加工材の断面組織写真

0%・0.04%・0.06%・0.08%・0.09%・0.1%の加工ひずみを与えた加工材断面組織写真を撮影した。これらのひずみは Fig. 3-9 の応力-ひずみ線図中のアラビア数字で記載した試験番号N o 1, 2, 3, 4, 5, 6 にそれぞれ対応した弾性範囲内の加工ひずみである。断面組織写真を Photo 3-6 から Photo 3-11 に示すが、加工ひずみは写真の左右方向より引張り応力を付与している。

Photo 3-6 は加工ひずみ 0%で応力 0 MPa, Photo 3-7 は加工ひずみ 0.04%で応力 55 MPa, Photo 3-8 は加工ひずみ 0.06%で応力 96 MPa, をそれぞれ付与した状態のまま光学顕微鏡にて撮影している。一方, Photo 3-9 から Photo 3-11 においては, 応力負荷状態では試験片を治具上で動かすことが出来なくなり, そのままでは顕微鏡上でピントを合わせることができないために, 除荷後に撮影を行っている。Photo 3-9 は加工ひずみ 0.08%で応力 125MPa を付与した後に除荷, Photo 3-10 は加工ひずみ 0.09%で応力 140MPa を付加した後除荷, Photo 3-11 は加工ひずみ 0.1%で応力 155MPa

JNC TY9400 2002-012
 を付加した後除荷した。

Photo 3-6 の 500 倍の写真において結晶方向が3方向で正三角形をなしており、また Photo 3-6 と Photo 3-8 の比較より、ひずみ増大に伴い組織表面上の起伏が増えていることが分かる。

Photo 3-6 では既に加工によるマルテンサイトが析出しているが、ひずみを増やす毎にマルテンサイトは増加しており、また双相がよりはっきりと見えるようになってきていることから、弾性域内でも応力を負荷することによってマルテンサイトが増加することが分かる。また、これが鉄系形状記憶合金特有の挙動の要因となっているものと考えられる。さらに、このことは非常に微少な応力もしくは加工ひずみによって加工硬化を促すことにもなり、それゆえに材料のヤング率等、機械的特性値がばらつく要因になるとも考えられる。

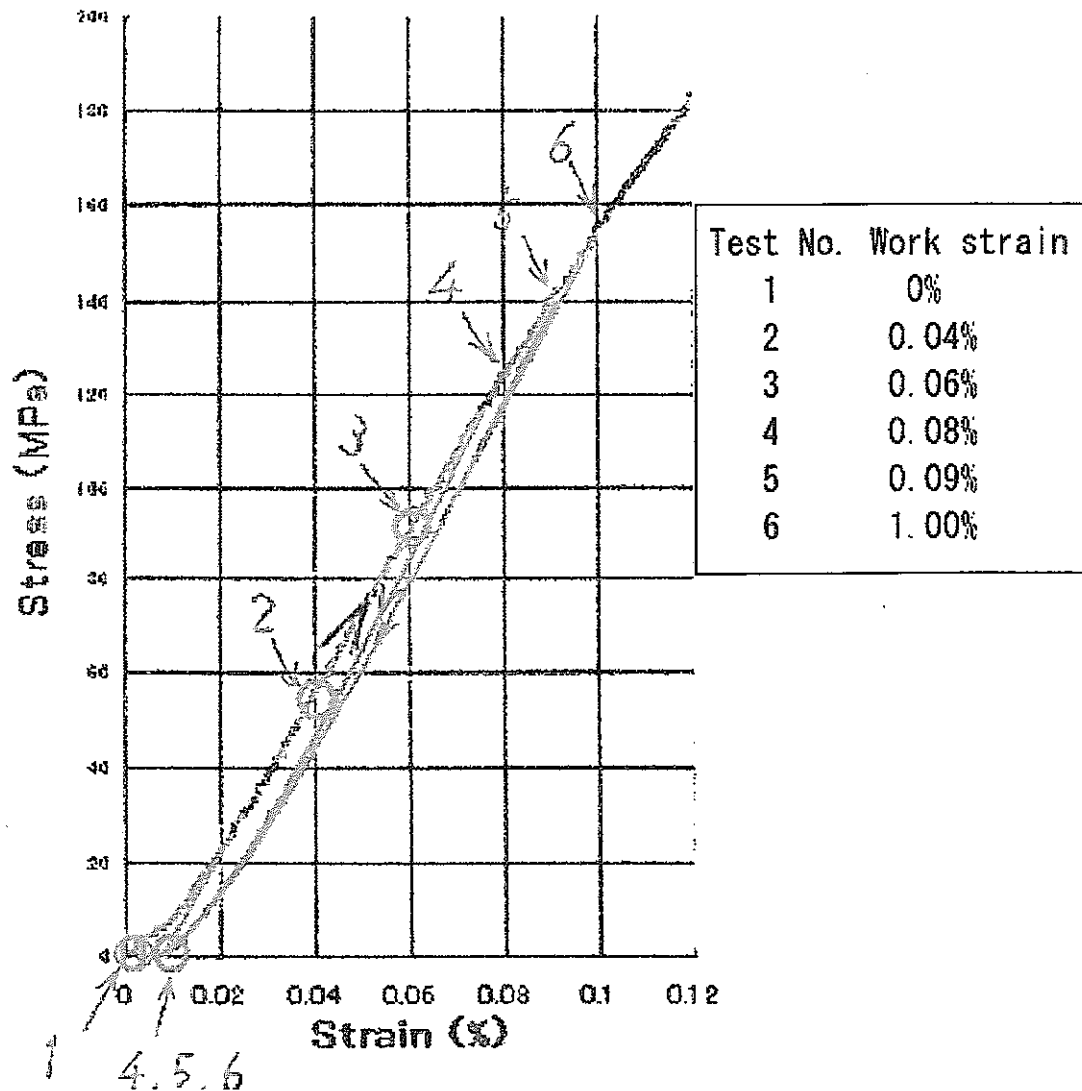


Fig. 3-9 Stress strain diagram of FSMA at elastic region
 鉄系形状記憶合金の弾性域における応力—ひずみ線図
 (試験片番号を图中的の1～6で示す)

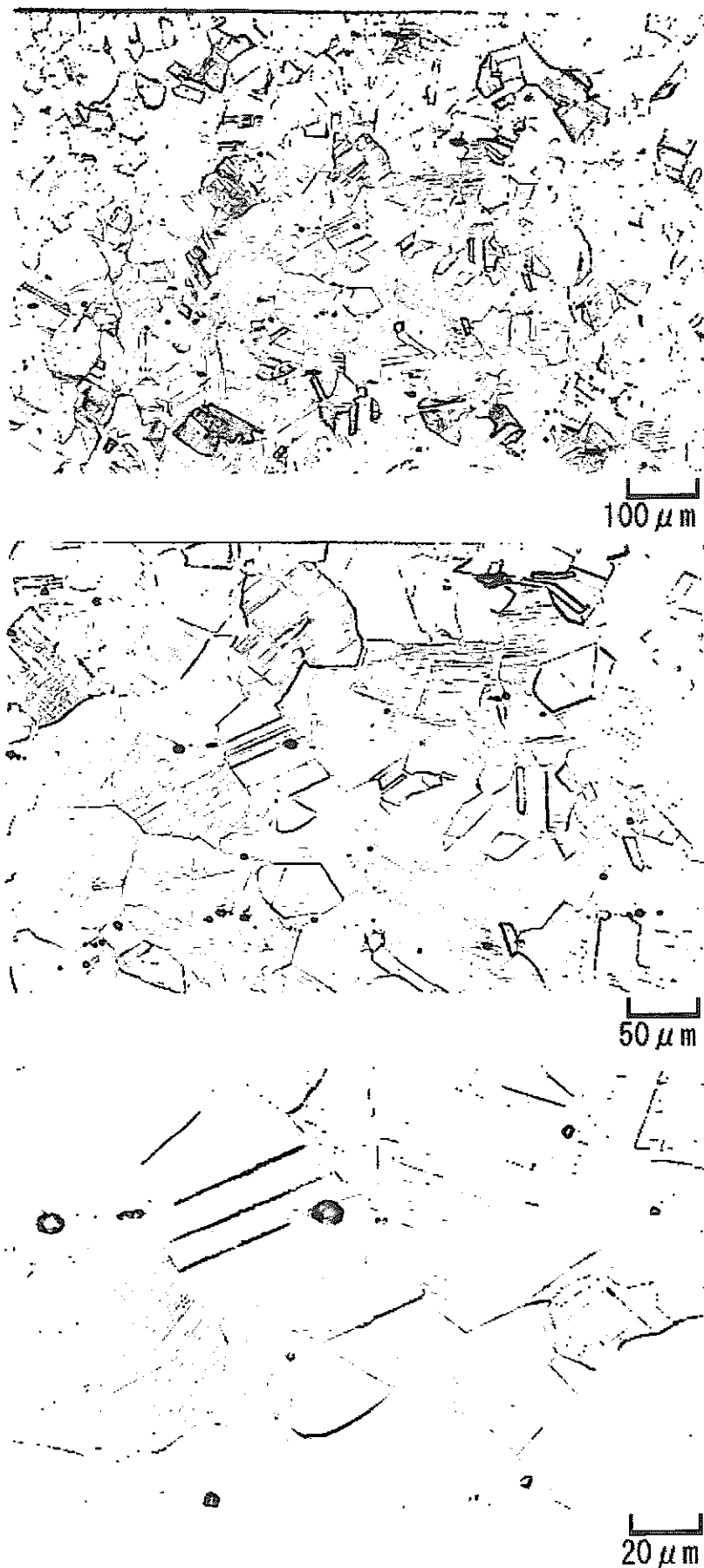


Photo 3-6 Microstructure of FSMA on loading at 0 % work strain and 0 MPa stress
0 %加工ひずみで 55MPa 応力付与時の鉄系形状記憶合金断面組織



100 μm



50 μm



20 μm

Photo 3-7 Microstructure of FSMA on loading at 0.04 % work strain and 55 MPa stress
0.04%加工ひずみで 96MPa 応力付与時の鉄系形状記憶合金断面組織

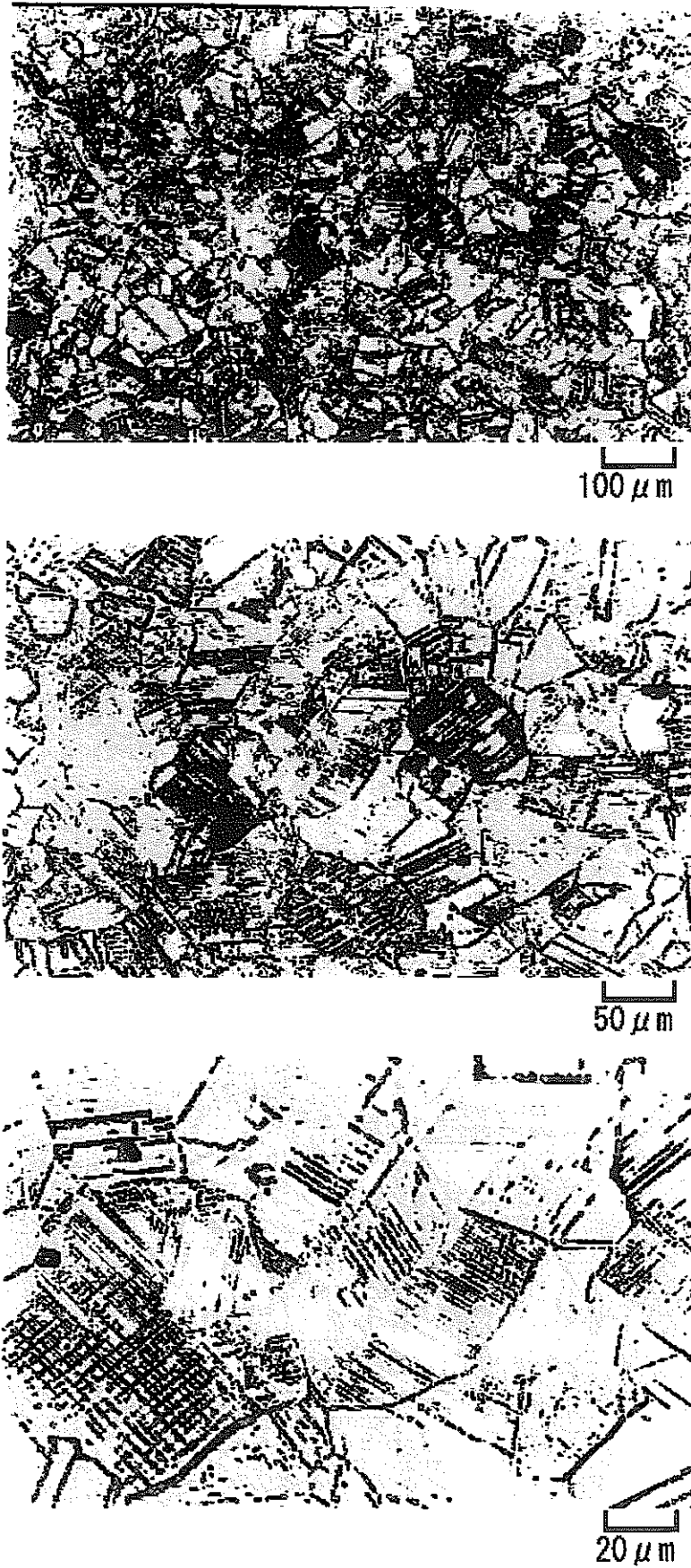


Photo 3-8 Microstructure of FSMA on loading at 0.06 % work strain and 96 MPa stress
0.06%加工ひずみで96MPa応力付与時の鉄系形状記憶合金断面組織

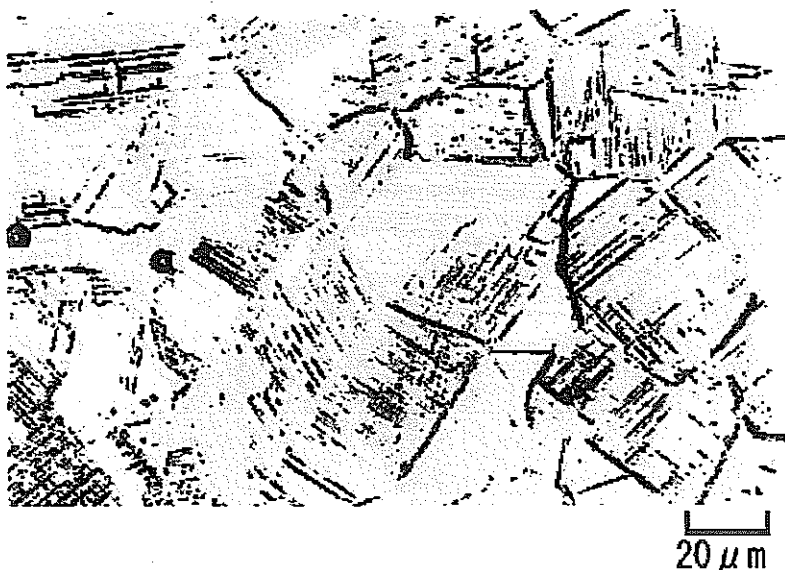


Photo 3-9 Microstructure FSMA after loading at 0.08 % work strain and 125 MPa stress
0.08%加工ひずみで 125MPa 応力付与後除荷した時の鉄系形状記憶合金断面組織

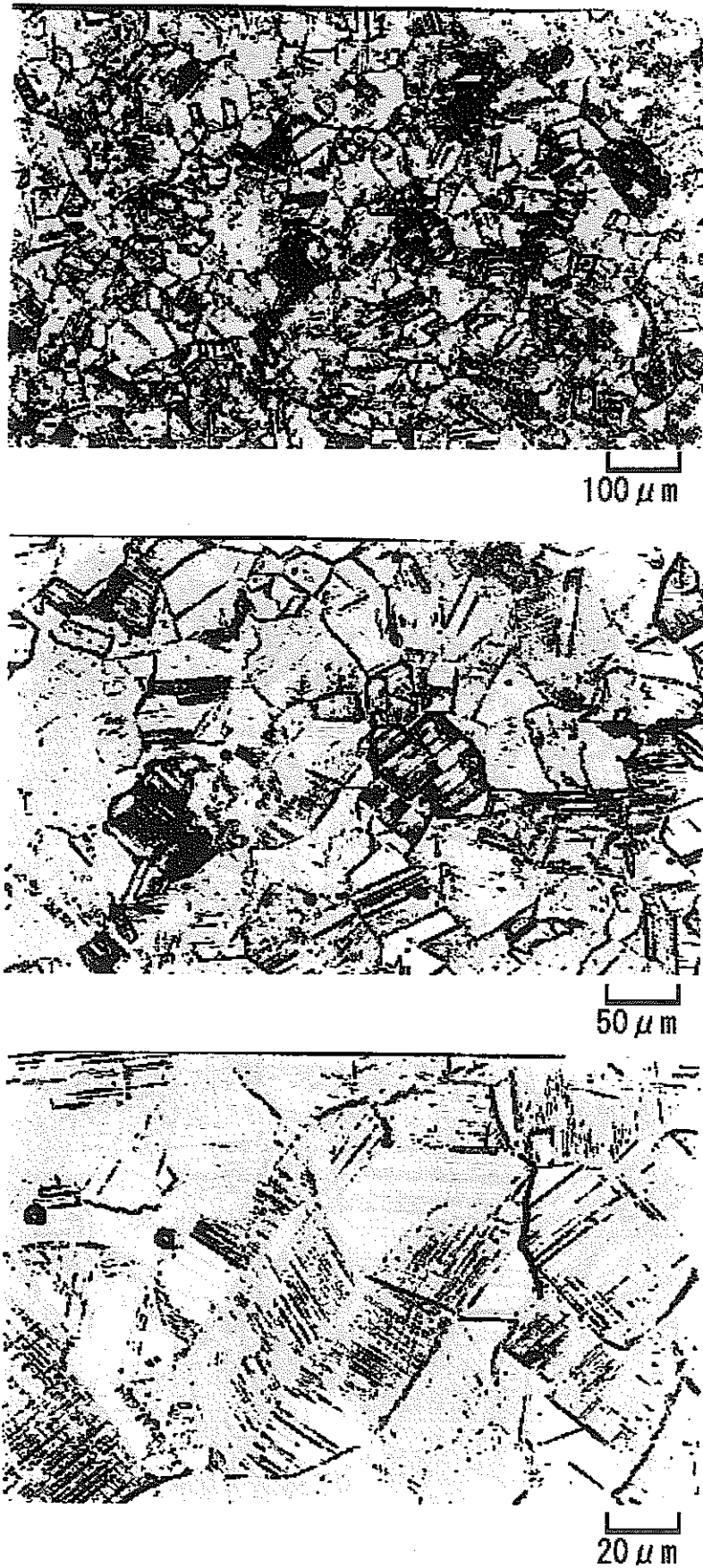


Photo 3-10 Microstructure of FSMA after loading at 0.09 % work strain and 140 MPa stress
0.09%加工ひずみで140MPa応力付与後除荷した時の鉄系形状記憶合金断面組織

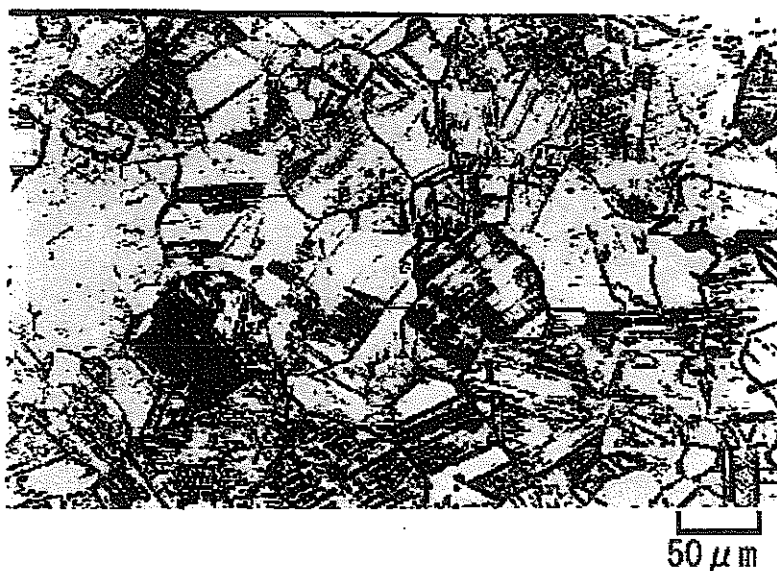
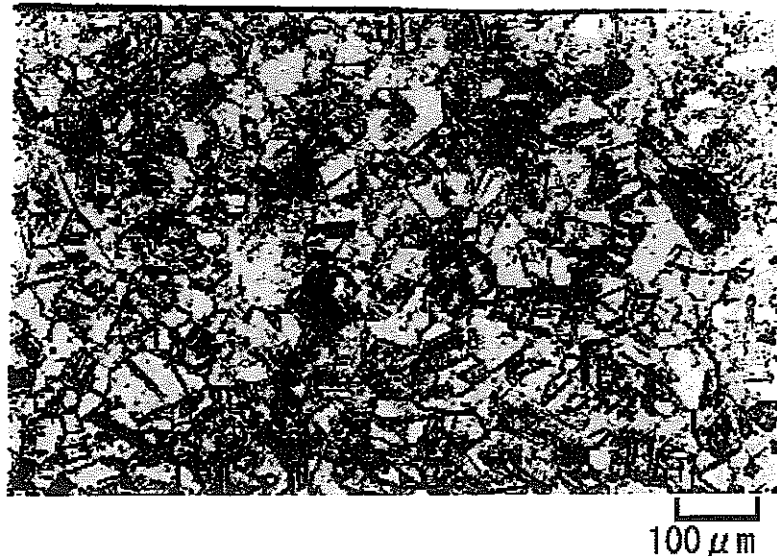


Photo 3-11 Microstructure of FSMA after loading at 0.1 % work strain and 155MPa stress
0.1%加工ひずみで 155MPa 応力付与後除荷した時の鉄系形状記憶合金断面組織

4 形状記憶特性試験

本試験では、形状記憶特性に及ぼす単軸引張、単軸圧縮、形状記憶処理におけるトレーニング効果および形状記憶熱処理における付加定応力の影響について検討した。

4. 1 単軸引張による基本記憶特性

4. 1. 1 試験方法

試験片には、丸棒材より作成した平行部直径 6 mm、標点距離 30 mm の高温引張試験片 II-6 形試験片を 12 本用いた。

まず、作成した試験片に加工ひずみを与えて ϵ -マルテンサイト変態加工を行うが、本試験では常温でのひずみ ϵ_w がそれぞれ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14 および 16% となるように、引張試験機で引張ひずみを付与した後、除荷することにより行った。

次に加熱による逆変態処理を行う。加工ひずみ材を 400°C に保持した Ar 雰囲気中の加熱炉に挿入し、10 分間保持した後に加熱炉から抽出して放冷した。ここで加熱条件の影響を調査するため、6% 加工ひずみ材については 50°C 間隔で段階的に 400°C に加熱して比較を行った。

最後に形状回復ひずみ ϵ_m を測定する。ここでは逆変態処理後材の標点距離および逆変態処理前材との変化量を測定した。これより形状回復ひずみ ϵ_m を、逆変態処理前材の標点距離に対する処理後材と、逆変態処理前材との標点距離変化量の割合として計算した。

4. 1. 2 試験結果

Table 4-1 および Fig. 4-1 に、基本記憶特性の調査結果を示す。

これによれば、形状回復ひずみ ϵ_m が最大値となる加工ひずみは約 5~6% で、この場合の ϵ_m は約 2% となる。結果にはバラツキがあるが、加工ひずみが 7% での ϵ_m は 1.95% および 2.28% (真ひずみで 1.93% および 2.35%) が得られており、加工ひずみ 6~7% で形状回復ひずみが最大となる可能性がある。

加工ひずみが 4% 以下では、ひずみが増加するにしたがって形状回復ひずみ ϵ_m も増加する傾向が認められる。ただし 1.83% (真ひずみで 1.82%) 以下と低い値を示す。

加工ひずみが 6~10% で形状回復ひずみ ϵ_m がもっとも大きくなり、この間ほぼ一定値をとるなるが、加工ひずみが増加するにしたがって ϵ_m が次第に減少し、加工ひずみ 12~16% では ϵ_m が 1.88% ~1.40% に減少する。

加工ひずみが 4%, 5% および 7% 材について再現試験を行った結果、加工ひずみ 4% 材で形状回復ひずみ ϵ_m が 1.76% (真ひずみで 1.75%), 5% 加工ひずみ材で ϵ_m が 1.85% (真ひずみで 1.83%) となり、先行試験結果に比べてやや小さくなった。一方で 7% 加工ひずみ材の ϵ_m は 2.38% (真ひずみで 2.35%) で、先行試験結果である ϵ_m が 1.95% (真ひずみで 1.93%) に比べてやや大きくなった。

加工ひずみ付与試験から求めた、単純引張によるトレーニング処理なし材の 0.2% 耐力は、平均値で 284MPa であり、単純引張試験で得られた値に比べてやや高めとなっている。

加熱条件の影響調査では、加工ひずみが 6% の材料を 400°C まで通常加熱条件および 50°C/step で加熱した場合の形状回復ひずみ ϵ_m を比較したが、それぞれ 1.95% (真ひずみで 1.93%) および 1.96% (真ひずみで 1.95%) でほとんど差がないことから、 ϵ_m に及ぼす加熱条件の影響はないと考えられる。

Table 4-1 Shape memory characteristic of FSMA on uniaxial tension
 単軸引張による鉄系形状記憶合金の記憶特性

No	試験材 番号	目標 変態加工 ひずみ量 (%)	初期値		変態加工後			0.2%耐力		逆変態処理 400°C×10min	逆変態後		形状記憶ひずみ量		試験後直径等	
			直径 d(mm)	標点距離 GL0(mm)	標点距離 GL1(mm)	公称ひずみ量 $\epsilon_n(\%)$	真ひずみ量 $\epsilon_t(\%)$	公称応力 (MPa)	真応力 (MPa)		標点距離 GL2(mm)	$\Delta GL2$ (mm) (GL2-GL1)	公称ひずみ $\epsilon_m(\%)$	真ひずみ $\epsilon_{mt}(\%)$	直径 (mm)	減少率 (%)
1	3	1	6.01	30.076	30.443	1.220	1.213	276	277	通常加熱	30.196	0.247	0.811	0.808	6.002	0.266
2	4	2	6.01	30.056	30.666	2.030	2.009	276	277	"	30.281	0.385	1.255	1.248		
3	5	3	6.02	30.111	31.071	3.188	3.138	269	270	"	30.501	0.570	1.835	1.818		
4	6	4	6.01	30.105	31.285	3.853	3.781	271	272	"	30.695	0.570	1.823	1.807	5.939	2.349
4-1	再2-2	4	6.01	30.062	31.242	3.325	3.850	319	320	"	30.692	0.550	1.760	1.745	5.944	2.184
5	7	5	6.01	30.075	31.555	4.921	4.804	284	285	"	30.910	0.645	2.044	2.023	5.895	3.790
5-1	再2-4	5	6.01	30.046	31.556	5.026	4.903	294	295	"	30.973	0.583	1.848	1.831	5.890	3.953
6	1	6	6.01	30.045	31.780	5.775	5.614	268	269	"	31.160	0.620	1.951	1.932	5.909	3.333
7	2	6	6.02	30.066	31.826	5.854	5.689	(258)	(259)	50°C/STEP加熱	31.201	0.625	1.964	1.945	5.892	4.207
8	8	7	6.01	30.080	32.174	6.961	6.730	254	255	通常加熱	31.548	0.627	1.947	1.929	5.852	5.183
8-1	再2-3	7	6.01	30.033	32.123	6.959	6.728	306	307	"	31.359	0.764	2.378	2.351	5.847	5.351
9	9	8	6.01	30.065	32.425	7.850	7.557	302	303	"	31.788	0.637	1.966	1.947		
10	10	10	6.02	30.081	33.041	9.840	9.386	299	300	"	32.386	0.655	1.982	1.963		
11	11	12	6.01	30.065	33.650	11.924	11.265	275	276	"	33.018	0.633	1.880	1.862		
12	12	14	6.01	30.098	34.278	13.888	13.005	293	294	"	33.743	0.535	1.561	1.549		
13	13	16	6.01	30.071	34.886	16.012	14.852	(306)	(307)	"	34.336	0.490	1.405	1.395	5.517	15.733

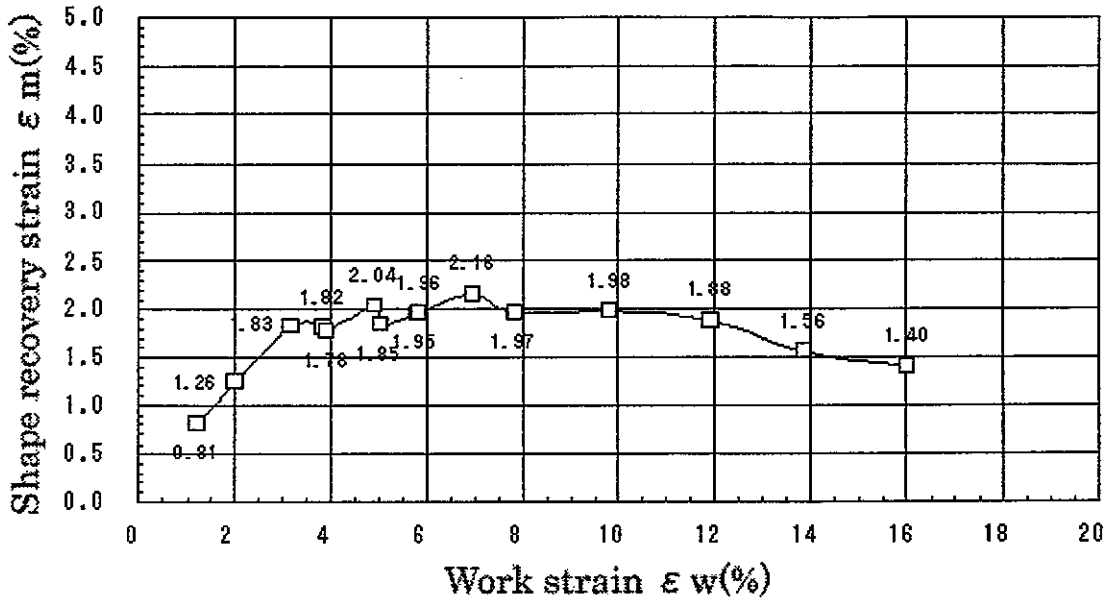


Fig. 4-1 Effects of work strain on shape recovery strain of FSMA without training treatment
 トレーニング処理なし材の形状記憶合金における形状記憶特性に及ぼす加工ひずみの影響

4. 2 単軸圧縮による基本記憶特性

4. 2. 1 試験片座屈の検討

(1) 高温引張試験片Ⅱ-6形における圧縮試験時の座屈

高温引張試験片Ⅱ-6形を用いて単軸圧縮試験を行う場合には座屈発生が懸念されるのでオイラーの式とランキンの式による座屈応力の計算を行った。

座屈荷重 P_K と座屈応力 σ_K に関するオイラーの理論式を (4.1), (4.2) 式に, 座屈応力に関するランキンの式を (4.3) 式に示す。

$$P_K = n\pi EI/l^2 \tag{4.1}$$

$$\sigma_K = P_K/A \tag{オイラーの式} \tag{4.2}$$

$$\sigma_K = \sigma_D / \{1 + a(l/k)^2\} \tag{ランキンの式} \tag{4.3}$$

オイラーの式は座屈応力 σ_K が材料の比例限度以下で適用される。(4.1), (4.2) 式より, 実際の試験においては試験片両端部をネジで締結するため, 両端回転端 ($n=1$) に相当すると考えられ, 計算を行うと, 座屈荷重 P_K は 65.4GN, 座屈応力 σ_K は 2312MPa となるが, この値は試験片の 0.2% 耐力 YS (270MPa) の約 10 倍となる。また, 座屈荷重がもっとも小さくなる条件として, 一端固定/他端自由端 ($n=1/4$) として計算しても, 前記計算値の 1/4 の値となり, YS の 2.7 倍となる。これより, 座屈に関しては約 3~10 倍安全であることになる。

一方, ランキンの式は, 塑性変形域に適用される。いま材料を軟鋼程度とした場合の座屈応力は, ランキンの式より 323MPa, 硬鋼程度とした場合は 453MPa となる。これは使用材圧縮強さの 92% から 95% に相当し座屈の恐れがあることが判明し, Ⅱ-6 形については採用しないこととした。

(2) 圧縮試験片による座屈

圧縮試験時に座屈を防止するため円柱試験片として長さ/径 (L/d) の比が小さい円柱圧縮試験片 ($L/d=12\text{mm}/8\text{mm}=1.5$) の使用を検討した。

オイラーの式から計算した圧縮試験片の座屈荷重 P_K は 745GPa, 座屈応力 σ_K は 14.8GPa であった。この値は, 高温引張試験片Ⅱ-6形の約 5 倍以上大きな値となり, 比例限度内での座屈は問題ないことになる。

一方, ランキンの式による座屈応力の計算では, 軟鋼程度として σ_K が 338MPa, 硬鋼程度として σ_K が 487MPa となり, 座屈応力がその材料の圧縮強さの約 99% に相当し, 座屈の問題は顕著でないと考える。

また, 圧縮試験片を用いた圧縮試験の予備試験を行った結果, ひずみ 16% の圧縮加工でも座屈は

発生しなかった。

以上より、圧縮試験には長さ一径比が小さい圧縮試験片が適当と考え、各ひずみ水準での試験を実施した。

4. 2. 2 試験方法

単軸圧縮による試験の試験片として、丸棒試験材より直径8mm、長さ12mmの圧縮試験片を作成した。

この試験片を用いて圧縮試験機でトレーニング処理なし材の単軸圧縮試験を行った。ここで、常温ひずみ ϵ_w は1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 14および16%, ひずみ速度は 1.39×10^{-4} /s(クロスヘッドの移動速度で0.1mm/min), 試験温度は常温とし、ひずみを付加した後に除荷した各試験片の長さおよびその変化量からひずみを計算した。圧縮試験機は、富士電波工業(株)製熱間加工再現装置(THERMECMASTOR-Z), 荷重容量は100kNを用いた。

圧縮試験の後、逆変態処理を行うが、前記の各加工ひずみ試験材につき、単軸圧縮試験に引き続き圧縮試験機内で $400^\circ\text{C} \times 10$ 分間保持を行い、その後冷却して処理を行った。

4. 2. 3 試験結果

形状回復ひずみ ϵ_m を測定するが、各加工ひずみ水準材につき、逆変態処理前材の長さに対する処理後材および処理前材の長さ変化量の割合から算出した。

結果をTable 4-2およびFig. 4-2, Fig. 4-3に、鉄系形状記憶合金の単軸圧縮試験による記憶特性として示す。

これによれば、単軸圧縮試験によるトレーニング処理なし材の形状回復ひずみは、加工ひずみが1から5%に増加するにつれて増加し、加工ひずみが約6%で最大値の1.92%(真ひずみで1.90%)を示している。

また、加工ひずみを7~16%に増加させるにしたがって形状回復ひずみは次第に減少し、加工ひずみ16%材では ϵ_m が1.3%となっている。

単軸圧縮試験における形状回復ひずみは、加工ひずみが約7%までの領域では単軸引張試験における測定結果と比較的近い値であるが、加工ひずみが約7%以上における形状回復ひずみは引張試験の場合のそれに比べてやや小さくなっている。

さらに、加工ひずみが大きい領域(7%以上)での単軸圧縮試験による形状回復ひずみは、単軸引張試験の結果に比べてやや小さくなる傾向が認められる。この原因としては、試験片の上下面と試験機側のポンチの固着の影響によるものと考えられる。それゆえ長さ(高さ)の変化以外にも、長さ方向の直径の変化などを考慮して解析する必要があると考えられる。

Table 4-2 Shape memory characteristic of FSMA by uniaxial compressive test
 単軸圧縮による鉄系形状記憶合金の記憶特性

試験材 番号	目標変態 加工ひずみ ε_w (%)	初期G L		加工ひずみ付与後			逆変態 処理	逆変態後		形状回復ひずみ	
		GL ₀ (mm)	GL ₁ (mm)	Δ GL ₁ (mm)	ひずみ実績値 (%)			GL ₂ (mm)	Δ GL ₂ (mm)	公称ひずみ ε_m (%)	真ひずみ ε_{mt} (%)
C1	1	12.055	11.930	0.125	1.037	1.032	400°C × 10min	12.030	0.100	0.838	0.835
C2		12.020	11.825	0.195	1.622	1.609		11.955	0.130	1.099	1.093
C3	2	11.945	11.715	0.230	1.925	1.907		11.866	0.151	1.289	1.281
C4	3	12.015	11.670	0.345	2.871	2.831		11.855	0.185	1.585	1.573
C5	4	11.960	11.480	0.480	4.013	3.935		11.690	0.210	1.829	1.813
C6	5	12.030	11.475	0.555	4.613	4.510		11.690	0.215	1.874	1.856
C7	6	11.980	11.270	0.710	5.927	5.758		11.485	0.215	1.908	1.890
C8	7	11.990	11.210	0.780	6.505	6.303		11.425	0.215	1.918	1.900
C9	8	11.904	11.042	0.862	7.241	6.991		11.246	0.204	1.847	1.831
C10	10	12.010	10.865	1.145	9.534	9.106		11.040	0.175	1.611	1.598
C11	12	12.025	10.565	1.460	12.141	11.459		10.720	0.155	1.467	1.456
C12	14	11.970	10.260	1.710	14.286	13.353		10.400	0.140	1.365	1.355
C13	16	12.023	10.200	1.823	15.163	14.117		10.331	0.131	1.284	1.276

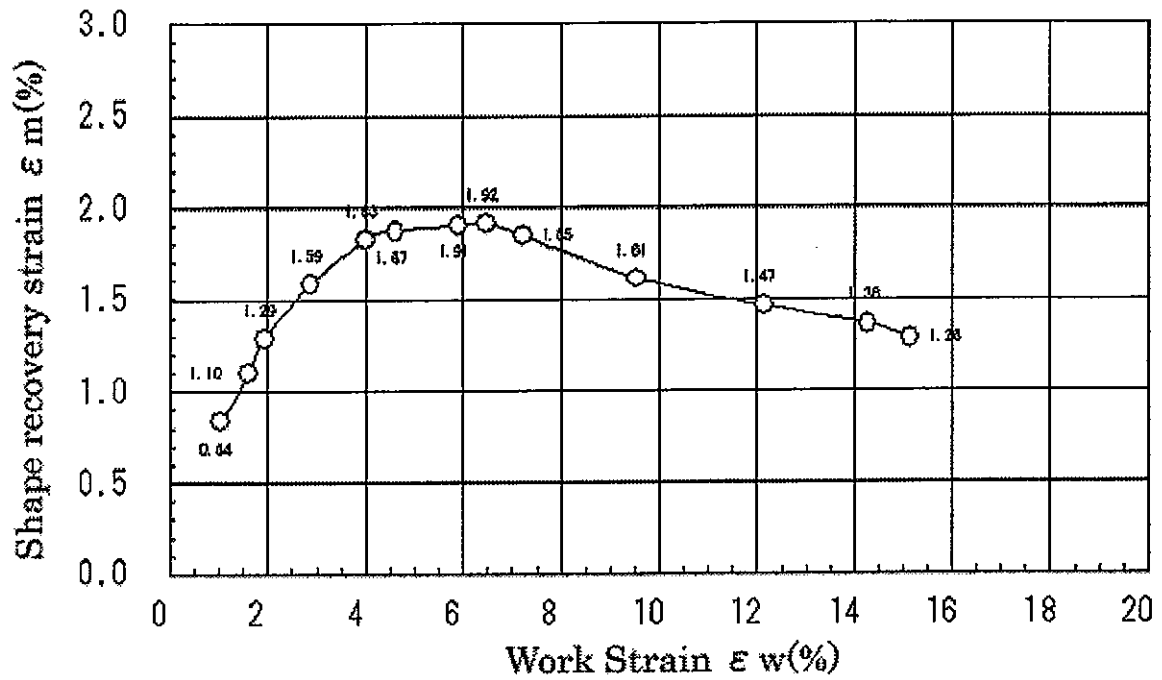


Fig. 4-2 Effects of work strain on shape recovery strain of FSMA at compressive test
単純圧縮による形状回復ひずみ (ϵ_m) に及ぼす加工ひずみの影響

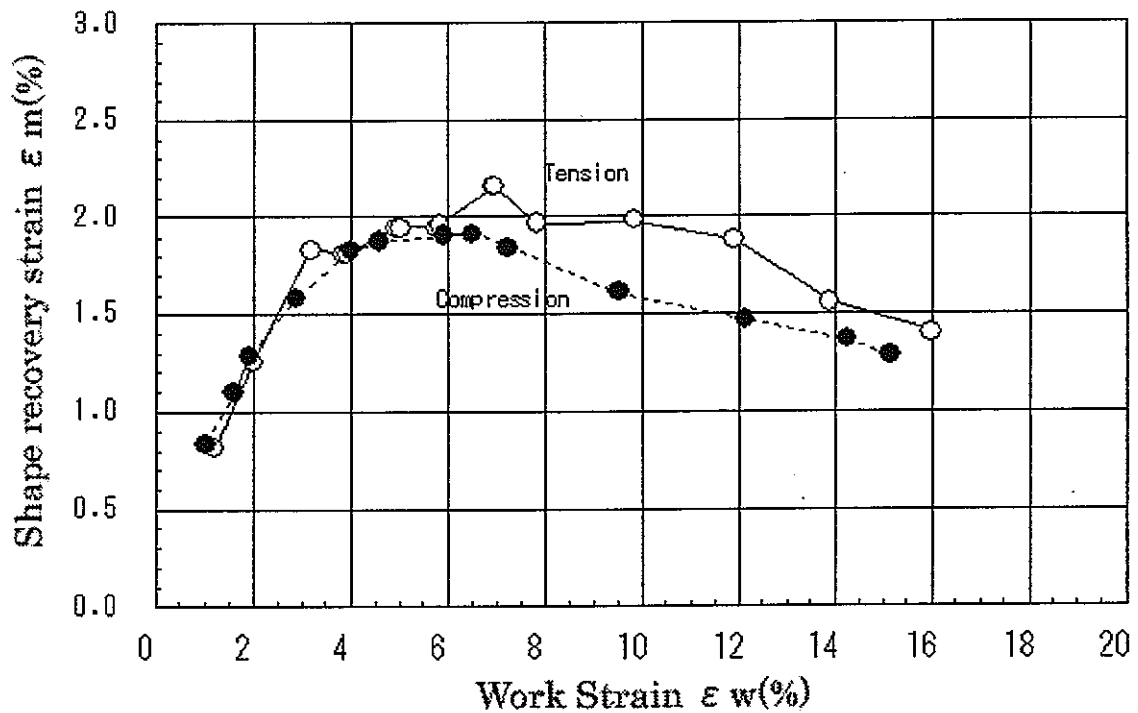


Fig. 4-3 Effects of tensile and compressive work strain on shape recovery strain for FSMA without training treatment
トレーニング処理なしの鉄系形状記憶合金の単純引張および単純圧縮おける形状回復ひずみに及ぼす加工ひずみの影響

4. 3 トレーニング材の記憶特性

4. 3. 1 試験方法

2. 5節で示す材料の丸棒試験片から、高温引張試験片Ⅱ-6形を12本作成した。これらの試験片について、常温で単軸引張によるひずみを5%付与したのち除荷を行い、さらに600°Cの温度に加熱して10分間保持のち空冷することで、トレーニング処理を行った。

このトレーニング処理材に、まず加工ひずみを付与した。常温におけるひずみ ϵ_w がそれぞれ1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14および16%となるように引張りひずみを付与し、その後除荷した。次に逆変態処理として、それぞれの加工ひずみ材を400°C・10分間のAr雰囲気での加熱処理を行い、その後放冷した。

最後に形状回復ひずみ ϵ_m の測定として、逆変態処理後材の標点距離および逆変態処理前材との変化量をそれぞれの加工ひずみ水準材ごとに測定した。これから形状回復ひずみ ϵ_m を逆変態処理前材の標点距離に対する逆変態処理後材と処理前材との標点距離変化量の割合として算出した。

4. 3. 2 試験結果

Table 4-3およびFig. 4-4にトレーニング処理材の形状記憶特性を示す。これによれば、トレーニング処理材の形状回復ひずみは加工ひずみ ϵ_w が5%で最大値となり、形状回復ひずみ ϵ_m は3.81%（真ひずみで3.74%）を示す。

加工ひずみが4%未満では、加工ひずみが増加するにしたがって形状回復ひずみがほぼ直線的に増加するが、その増加量は1.5%~3%以下と小さい。

加工ひずみが5%超では加工ひずみが増加するにしたがって形状回復ひずみが次第に減少し、加工ひずみが16%材では形状回復ひずみ ϵ_m は約2.58（真ひずみで2.55%）となる。

また、本試験で用いたトレーニング処理材の初期の5%加工ひずみ付与時における回復ひずみは約1.9%であり、トレーニング処理なし材と同程度であるが、このトレーニング処理によって、形状回復ひずみ最大値となる5%加工ひずみ材では、トレーニング処理材はトレーニング処理なし材よりも回復ひずみが約1.5%も大きい値となった。

Table 4-3 Shape memory characteristic of FSMA with training processing on uniaxial tension
 単軸引張によるトレーニング処理材の形状記憶特性

試験材 番号	初期値		トレーニング処理				トレーニング処理後			目標 変態加工 ひずみ ϵ_w (%)	変態加工後			逆変態 処理 400℃ × 10min (通常加熱)	逆変態後		形状回復ひずみ	
	直径 d(mm)	標点距離 GL0(mm)	加工ひずみ (目標)	ひずみ実績値(%) 公称ひずみ	真ひずみ	加熱処理 600℃ × 10min	標点距離 GL2(mm)	回復ひずみ(%) 公称ひずみ	真ひずみ		標点距離 GL3(mm)	ひずみ実績値(%) 公称ひずみ	真ひずみ		標点距離 GL4(mm)	公称ひずみ ϵ_m (%)	真ひずみ ϵ_{tm} (%)	
2-5	6.01	30.081	5%	4.460	4.363	"	30.863	1.781	1.765	1	31.280	1.95	1.342	"	30.813	1.493	1.482	
2-6	6.02	30.063	"	4.440	4.344	"	30.808	1.878	1.861	2	31.486	2.20	2.177	"	30.843	2.042	2.022	
2-7	6.01	30.059	"	4.880	4.785	"	30.902	1.979	1.960	3	31.857	3.09	3.044	"	31.080	2.439	2.410	
2-8	6.00	30.086	"	4.790	4.679	"	30.913	1.948	1.929	4	32.153	4.01	3.933	"	31.181	3.023	2.978	
2-9	6.00	30.069	"	4.910	4.793	"	30.925	1.967	1.948	5	32.575	5.34	5.198	"	31.335	3.807	3.736	
2-10	6.01	30.064	"	4.860	4.746	"	30.908	1.964	1.945	6	32.796	6.12	5.936	"	31.662	3.458	3.399	
2-11	6.01	30.046	"	4.990	4.869	"	30.929	1.954	1.935	7	33.134	7.13	6.887	"	32.055	3.258	3.205	
2-12	6.01	30.048	"	4.870	4.755	"	30.922	1.870	1.853	8	33.492	8.31	7.984	"	32.370	3.350	3.295	
2-13	5.99	30.063	"	4.850	4.736	"	30.928	1.881	1.864	10	34.043	10.07	9.596	"	32.941	3.237	3.186	
2-17	6.01	30.059	"	4.860	4.746	"	30.902	1.960	1.941	12	34.557	11.83	11.181	"	33.639	2.656	2.622	
2-15	6.00	30.050	"	4.780	4.669	"	30.885	1.910	1.892	14	35.195	13.95	13.063	"	34.160	2.941	2.898	
2-16	6.01	30.048	"	4.970	4.850	"	30.892	2.059	2.038	16	35.832	15.99	14.834	"	34.907	2.581	2.549	

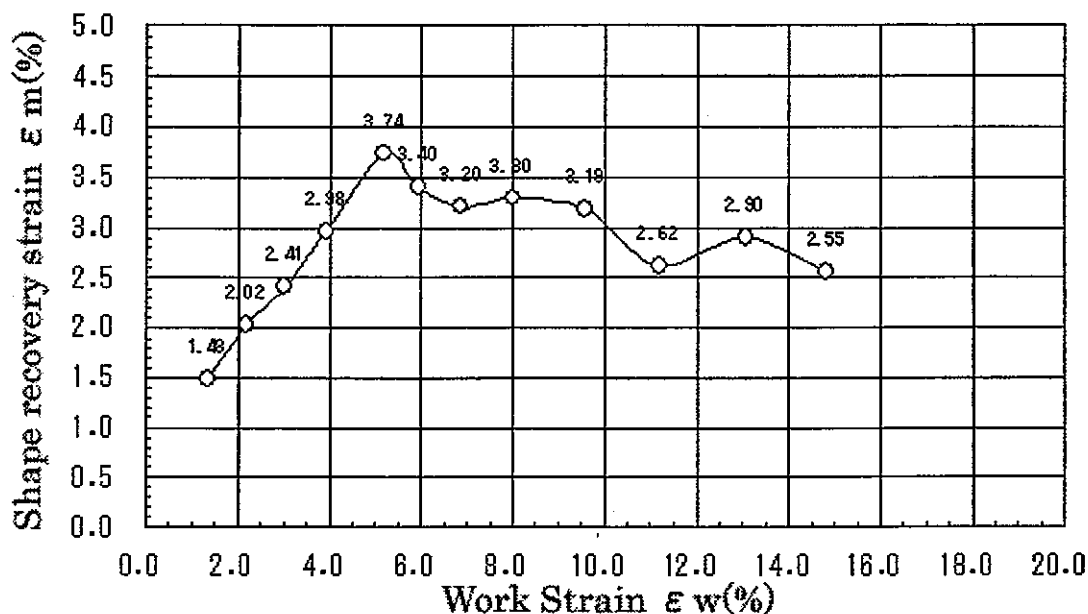


Fig. 4-4 Effect of work strain on shape recovery strain of FSMA with training treatment
 トレーニング処理した鉄系形状記憶合金の形状記憶特性に及ぼす変態加工ひずみの影響

4. 3. 3 トレーニングの効果

トレーニング処理材とトレーニング処理なし材の形状回復ひずみに及ぼす加工ひずみの影響を Fig. 4-5 に示した。トレーニングの効果は加工ひずみが約 1% から 15% の範囲において、トレーニング処理材の形状回復ひずみはトレーニング無し材の形状回復ひずみに比べて 1.4 倍から 1.9 倍程度の値となっている。特にトレーニング処理後の加工ひずみが 2% 以下の領域では形状回復ひずみは加工ひずみと同等大ききまで増加したことが確認された。以上のことから 5% の引張加工後 600℃ で 10 分間の 1 回のトレーニング処理により、鉄系形状記憶合金の形状回復率が著しく改善され、条件によっては形状回復率がほぼ 100% に達することが確認された。

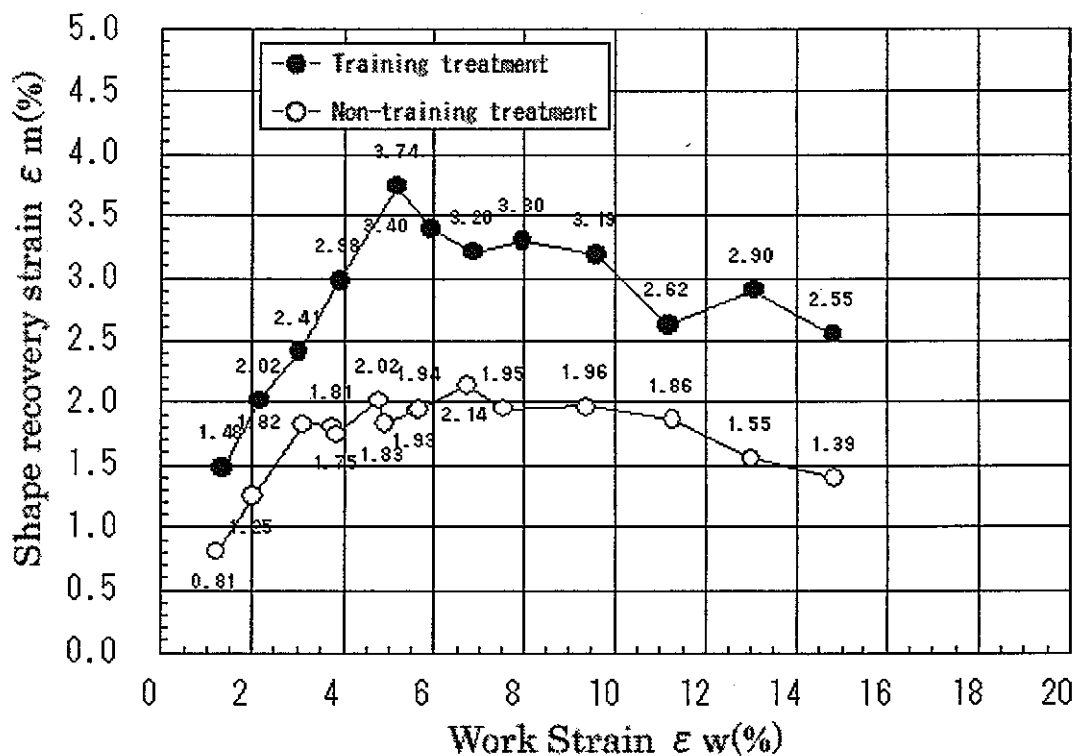


Fig. 4-5 Comparison between with and without training treatment on shape recovery strain
 形状回復ひずみに関するトレーニング処理材とトレーニングなし材比較

4. 4 定応力下の記憶特性

形状記憶合金の形状記憶特性に及ぼす形状記憶熱処理時に付加する応力の影響について明らかにするため以下の実験を行った。付加する応力を単軸引張と単軸圧縮の一定に保持して、形状記憶特性の影響を観察した。単軸引張定応力試験は「引張加工ひずみを与えた後に引張定応力下で形状記憶熱処理を行う単軸引張り加工ひずみ・単軸引張定応力試験」である。単軸圧縮定応力試験は「圧縮加工ひずみを与えた後に圧縮定応力下で形状記憶熱処理を行う単軸圧縮加工ひずみ・単軸圧縮定応力試験」と「引張加工ひずみを与えた後に圧縮定応力下で形状記憶熱処理を行う単軸引張加工ひずみ・単軸圧縮定応力試験」の2通りとした。

4. 4. 1 単軸引張定応力下の記憶特性

(1) 試験方法

試験片形状は高温引張試験片Ⅱ-6形で丸棒から製作した。まず単軸引張試験により前記の試験片に常温でそれぞれ目標加工ひずみ3%、5%および10%の単軸引張加工ひずみを与えた後、除荷した。次に、加工ひずみを与えた試験後材に常温で所定の単軸引張応力を付加した後、引張試験機に付属した加熱炉中で400℃の温度に加熱し、ひずみが一定値になるまで炉内で保持した後、常温まで冷却し除荷した。ここで付加した定応力は、各目標加工ひずみに対してそれぞれ、0MPa、140MPaおよび300MPaとした。試験時のひずみの測定は試験機の伸び計による方法と試験による試験片標点距離GLの変化量ΔGLから求める方法の2通りで行った。なお加工ひずみは試験片の円周方向4ヶ所における測定値の平均値とした。Table 4-4に示すように3%加工ひずみ材における実績加工ひずみの平均値は約3.08±0.1%、5%加工ひずみ材における実績加工ひずみの平均値は約4.99±0.04%、10%加工ひずみ材における実績加工ひずみの平均値は約10.12±0.10%であった。

Table 4-4 Results of tensile constant stress test after tensile work strain applied
単軸引張加工ひずみ材の単軸引張定応力試験の結果

TP-No	初期寸法 (mm)		加工ひずみ (%)	定応力 (MPa)	定応力後試験寸法 (mm)						定応力試験時のひずみ変化 (%)				形状回復ひずみ (%)
	GL0	直径 D0			GL1	GL1-GL0	εn (%)	εt (%)	D1	D1-D0	加工ひずみ付与後 εwf	形状回復前のひずみ εms	εwf-εms	形状回復後のひずみ εmf	
r023-k-03axb	30.028	6.01	3	0	30.516	0.488	1.625	1.612	5.96	-0.050	2.955	3.061	-0.106	1.347	1.714
r023-k-04axb	30.010	6.01	3	140	30.730	0.720	2.399	2.371	5.94	-0.070	3.049	2.978	0.071	2.027	0.951
r023-k-05axb	30.079	6.01	3	300	31.203	1.124	3.737	3.669	5.90	-0.110	3.002	3.018	-0.016	3.453	-0.435
r023-k-06axb	30.023	6.02	5	0	30.951	0.928	3.091	3.044	5.93	-0.090	4.868	4.889	-0.021	3.076	1.813
r023-k-07axb	30.030	6.01	5	140	31.421	1.391	4.632	4.528	5.89	-0.120	4.880	4.856	0.024	4.163	0.693
r023-k-08axb	30.012	6.01	5	300	31.495	1.483	4.941	4.823	5.88	-0.130	4.846	4.824	0.022	4.883	-0.059
r023-k-09axb	30.086	6.01	10	0	32.468	2.382	7.917	7.620	5.77	-0.240	9.330	9.299	0.031	7.469	1.830
r023-k-10axb	30.020	6.01	10	140	32.824	2.804	9.340	8.930	5.75	-0.260	9.550	9.532	0.018	8.848	0.684
r023-k-11axb	29.990	6.00	10	300	33.036	3.046	10.157	9.673	5.66	-0.340	9.528	9.492	0.036	9.573	-0.081

(2) 試験結果

引張加工ひずみを3%、5%、10%とし、引張定応力を0MPa、約140MPa、約300MPaとした場合の形状記憶特性に及ぼす影響を調査した。

① 形状回復ひずみに及ぼす単軸引張加工ひずみと単軸引張定応力の影響

Table 4-4とFig. 4-6に形状回復ひずみに及ぼす単軸引張加工ひずみと単軸引張定応力の影響を示した。

付加応力が0MPaの形状回復ひずみは、3%加工ひずみでは約1.7%、5%加工ひずみおよび10%加工ひずみでは約1.8%である。形状記憶効果は加工ひずみが5%で最大となる。

付加応力が140MPaの形状回復ひずみは、3%加工ひずみで約1.0%、5%と10%の加工ひずみではいずれも約0.7%であり、形状記憶効果は加工ひずみ3%で最大である。

付加応力が300MPaの形状回復ひずみは3%加工ひずみで約-0.4%、5%加工ひずみと10%加工ひずみでは約-0.1%である。

これら結果から、引張応力が増大するほど、ひずみの回復量は減少することがわかる。

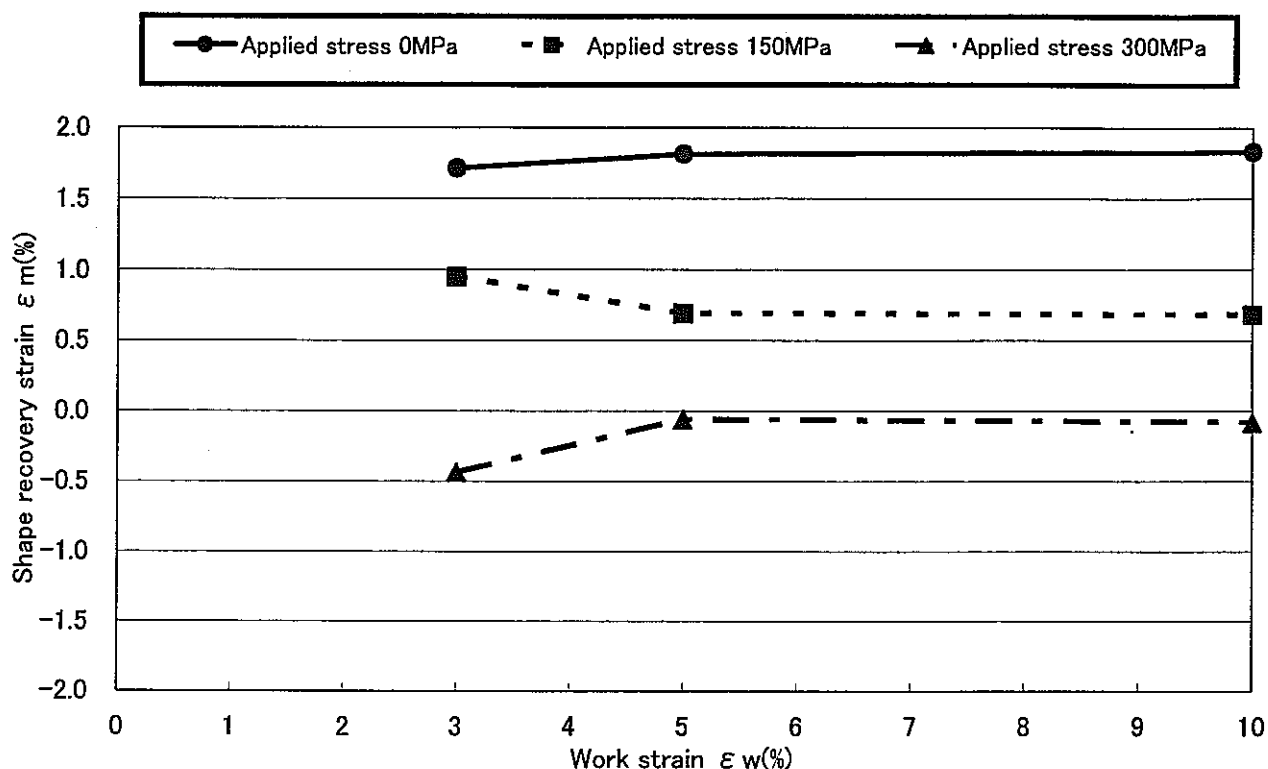


Fig. 4-6 Effects of tensile work strain and tensile constant stress on shape recovery strain
形状回復ひずみに及ぼす引張加工ひずみと引張定応力の影響

② 3%引張加工ひずみ・引張定応力の影響

3%引張加工ひずみ材の引張定応力試験における「ひずみ」と「応力」と「温度」の関係を Fig. 4-7 ~ Fig. 4-9 に示している。

付加する引張定応力が 0 MPa の場合、ひずみは約 350°C までの加熱時に約 1.2% 減少し、400°C までの加熱で約 0.2% 増加し、400°C からの冷却時にひずみは約 0.7% 減少する。

付加する引張定応力が 140MPa の場合、ひずみは 0 MPa の場合と同様の変化を示すが、定応力付加時に約 0.1% 増加し、350°C までの加熱でひずみは約 0.5% 減少し、400°C までの加熱で約 0.1% 増加する。そして冷却時には約 0.6% 減少し、除荷時に約 0.1% 減少する。

付加する引張定応力が 300MPa 材の場合、ひずみは応力付加時に約 0.3% 増加し、加熱するに従い約 1.1% 増加し、冷却時には約 0.6% 減少し、除荷時に約 0.3% 減少する。

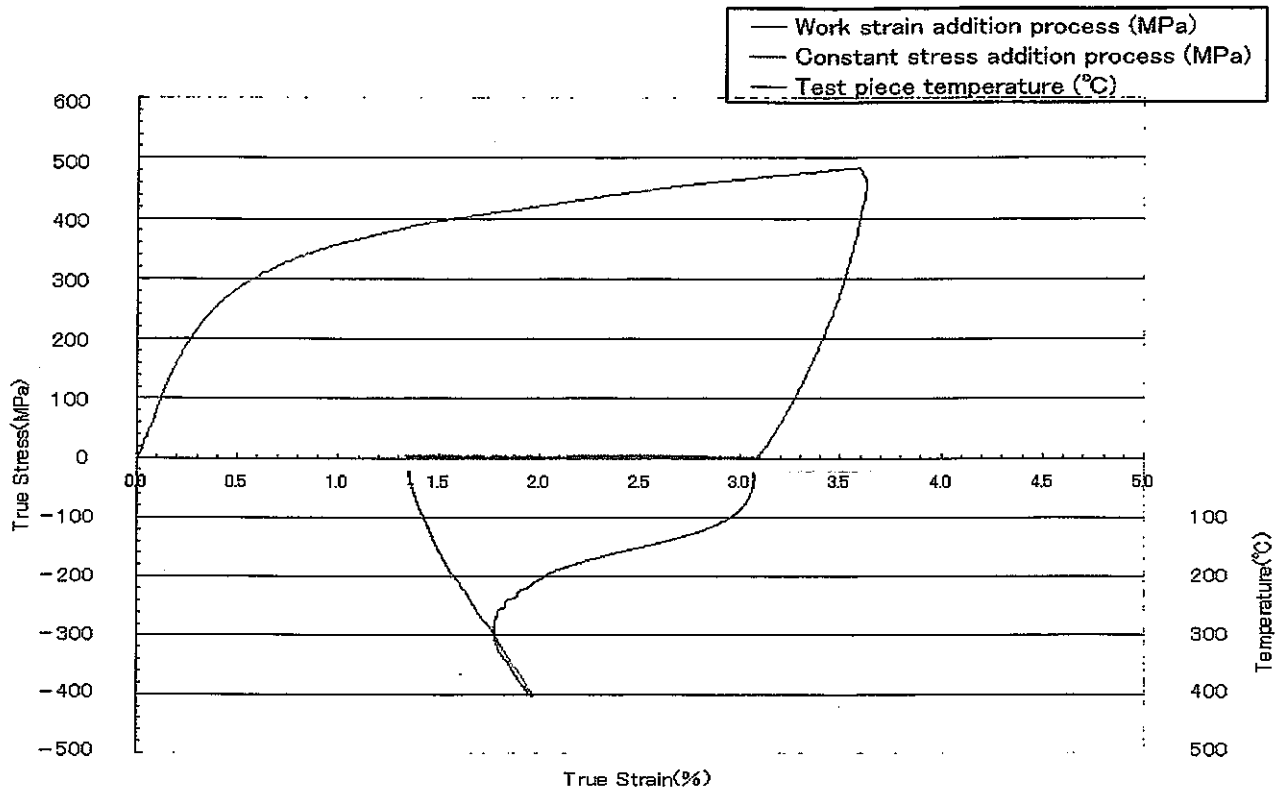


Fig. 4-7 Stress-strain-temperature diagram at 0 MPa tensile constant stress test for FSMA with 3% tensile work strain
 3%引張加工ひずみ材の0 MPa 引張定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

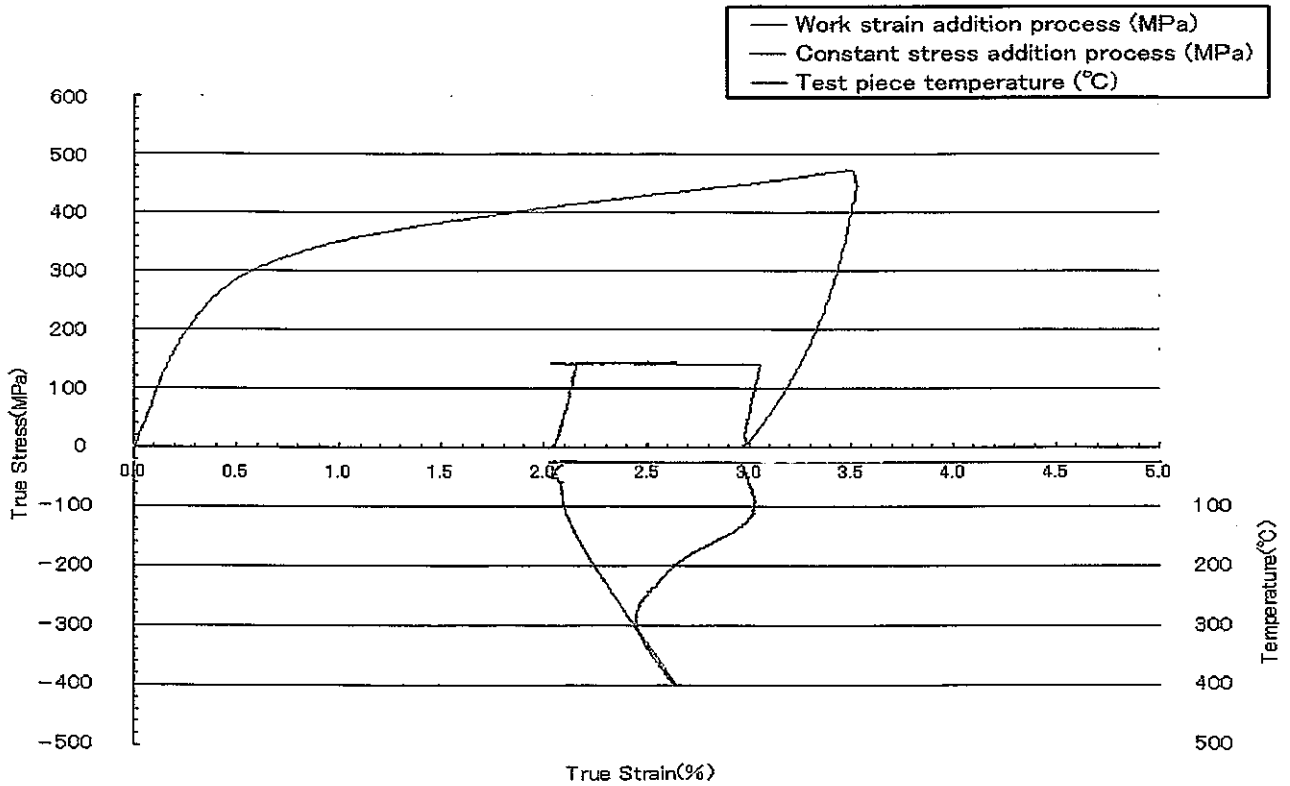


Fig. 4-8 Stress-strain-temperature diagram at 140 MPa tensile constant stress test for FSMA with 3% tensile work strain
 3%引張加工ひずみ材の140 MPa 引張定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

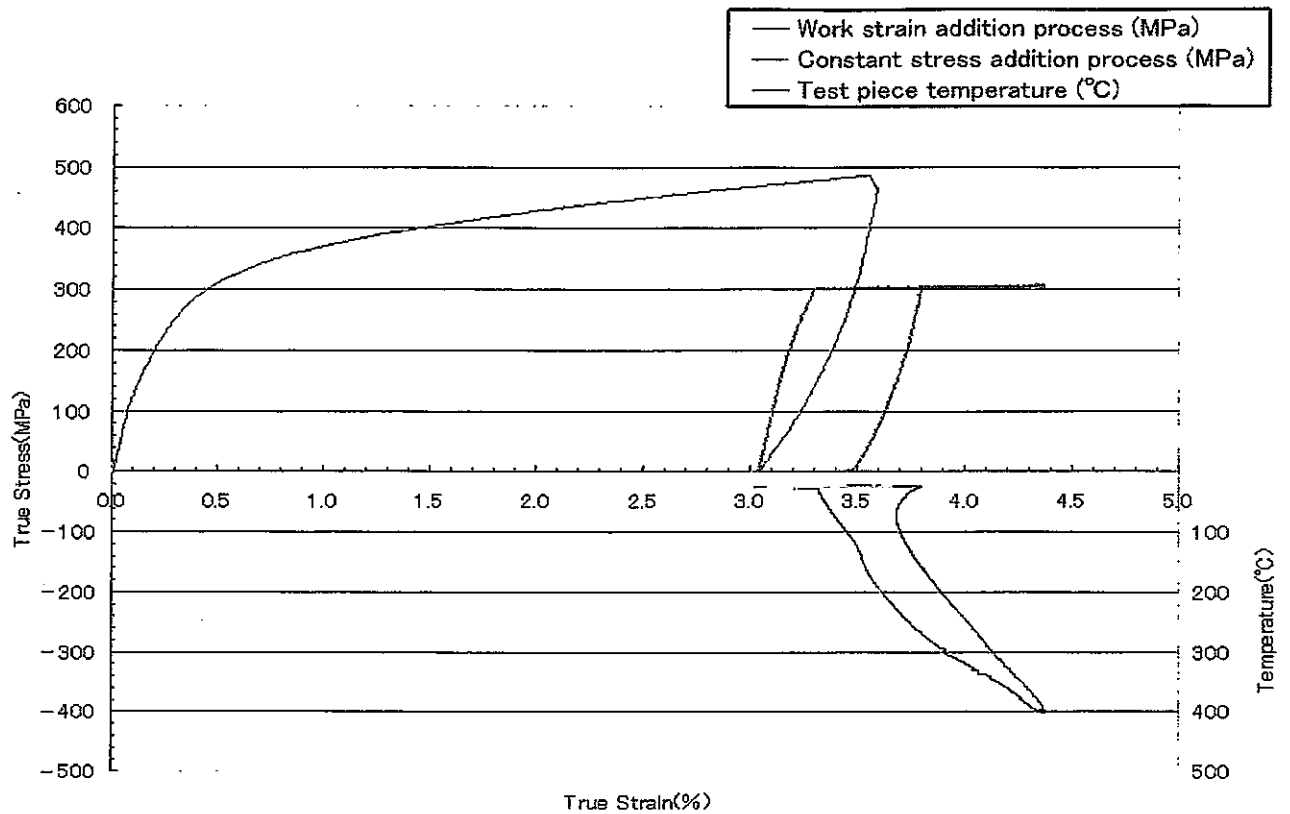


Fig. 4-9 Stress-strain-temperature diagram at 300 MPa tensile constant stress test for FSMA with 3% tensile work strain
 3%引張加工ひずみ材の付加応力 300 MPa 引張定応力試験における応力—ひずみ—温度線図

③ 5%引張加工ひずみ・引張定応力の影響

5%引張加工ひずみ材の引張定応力試験における「応力」と「ひずみ」と「温度」の関係を Fig. 4-10～Fig. 4-12 に示している。

付加する引張定応力が 0 MPa の場合、ひずみは約 350°C までの加熱時に約 1.3% 減少し、400°C までの加熱で約 0.1% 増加し、400°C からの冷却時にひずみは約 0.6% 減少する。

付加する引張定応力が 140 MPa の場合は、ひずみは定応力付加時に約 0.1% 増加し、350°C までの加熱でひずみは約 0.1% 増加し、400°C までの加熱で約 0.2% 増加し、冷却時に約 0.9% 減少し、除荷時に約 0.1% 減少する。

付加する引張定応力が 300 MPa の場合、ひずみは応力付加時に約 0.2% 増加し、350°C 程度までの加熱で約 0.5% 増加し、400°C までの加熱で約 0.2% 程度増加し、冷却時には約 0.6% 減少し、除荷時に約 0.3% 減少する。

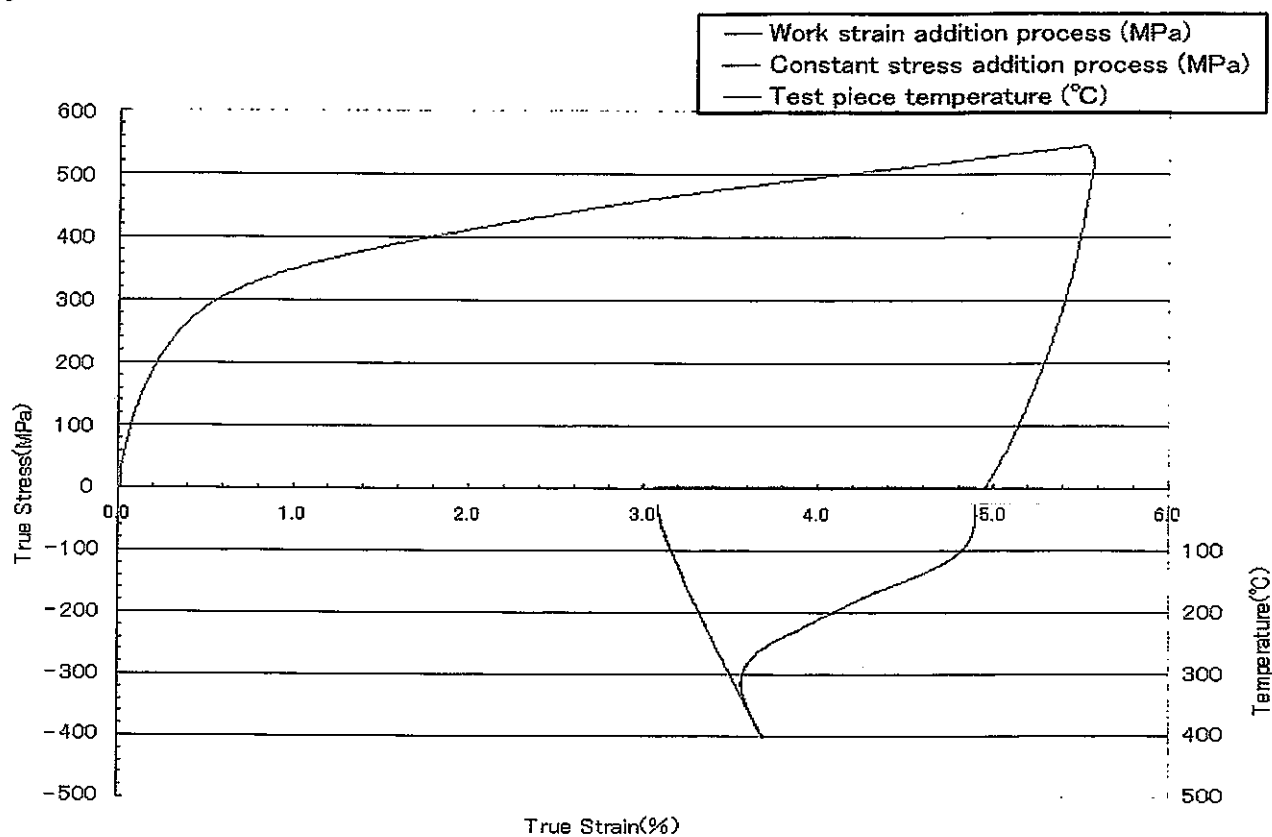


Fig. 4-10 Stress-strain-temperature diagram at 0 MPa tensile constant stress test for FSMA with 5% tensile work strain
5%引張加工ひずみ材の0 MPa 引張定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

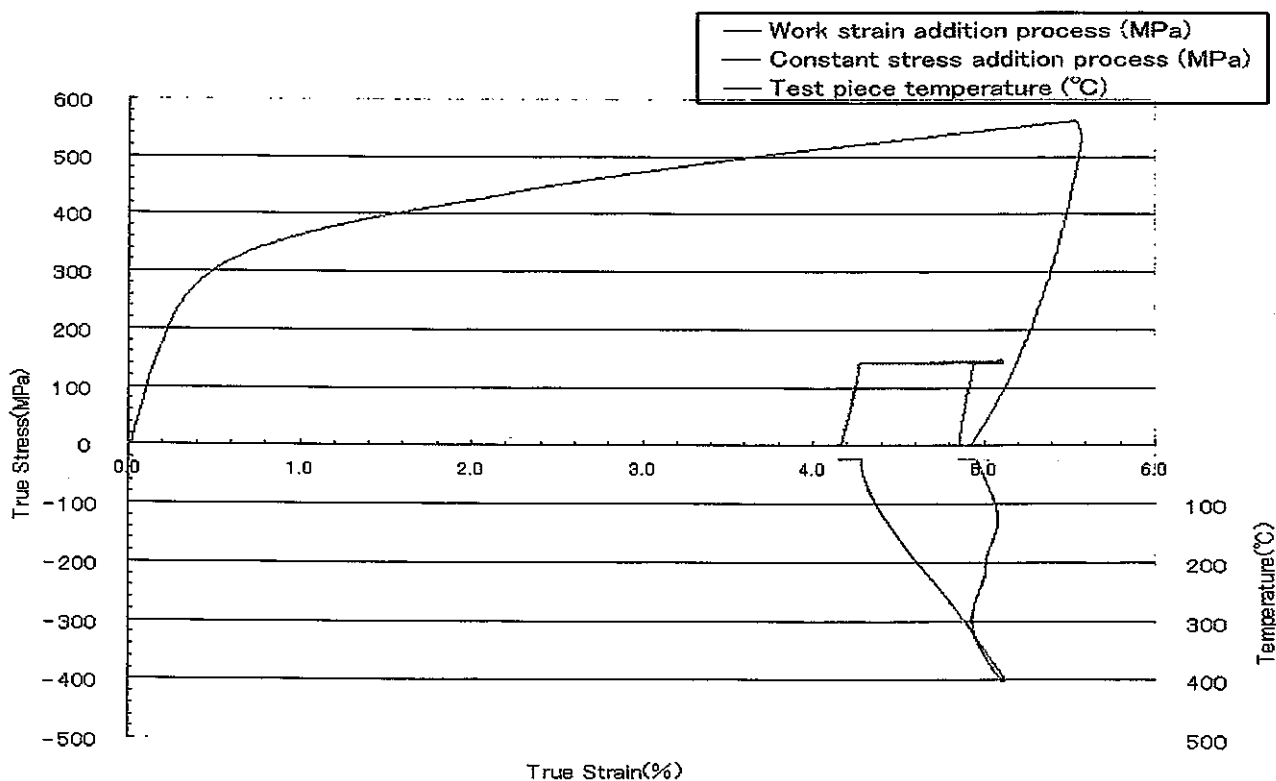


Fig. 4-11 Stress-strain-temperature diagram at 140 MPa tensile constant stress test for FSMA with 5% tensile work strain
5%引張加工ひずみ材の140 MPa 引張定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

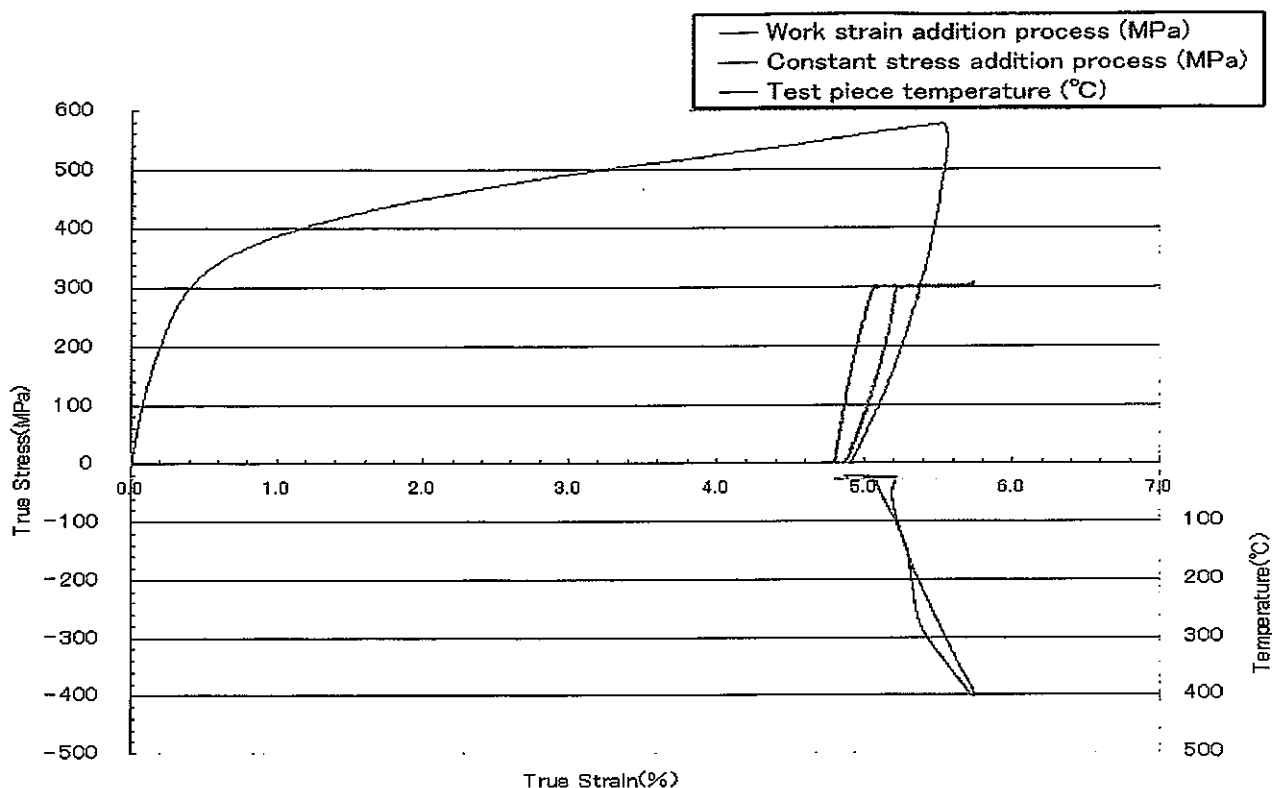


Fig. 4-12 Stress-strain-temperature diagram at 300 MPa tensile constant stress test for FSMA with 5% tensile work strain
 5%引張加工ひずみ材の300MPa引張定応力試験における応力—ひずみ—温度線図

④ 10%引張加工ひずみ・引張定応力の影響

10%引張加工ひずみ材の引張定応力試験における「ひずみ」と「応力」と「温度」の関係を Fig. 4-13～Fig. 4-15 に示している。

付加する引張定応力が 0 MPa の場合、ひずみは約 350°C までの加熱時に約 1.3% 減少し、400°C までの加熱で約 0.1% 増加し、400°C からの冷却時にひずみは約 0.8% 減少する。

付加する引張定応力が 140 MPa の場合は、ひずみは定応力付加時に約 0.1% 増加し、350°C までの加熱でひずみは約 0.1% 減少し、400°C までの加熱で約 0.2% 増加し、冷却時に約 0.7% 減少し、除荷時に約 0.2% 減少する

付加する引張定応力が 300 MPa 材の場合は、ひずみは応力付加時に約 0.3% 増加し、350°C 程度までの加熱で約 0.7% 増加し、400°C までの加熱で約 0.2% 程度増加し、冷却時には約 0.8% 減少し、除荷時に約 0.4% 減少する。

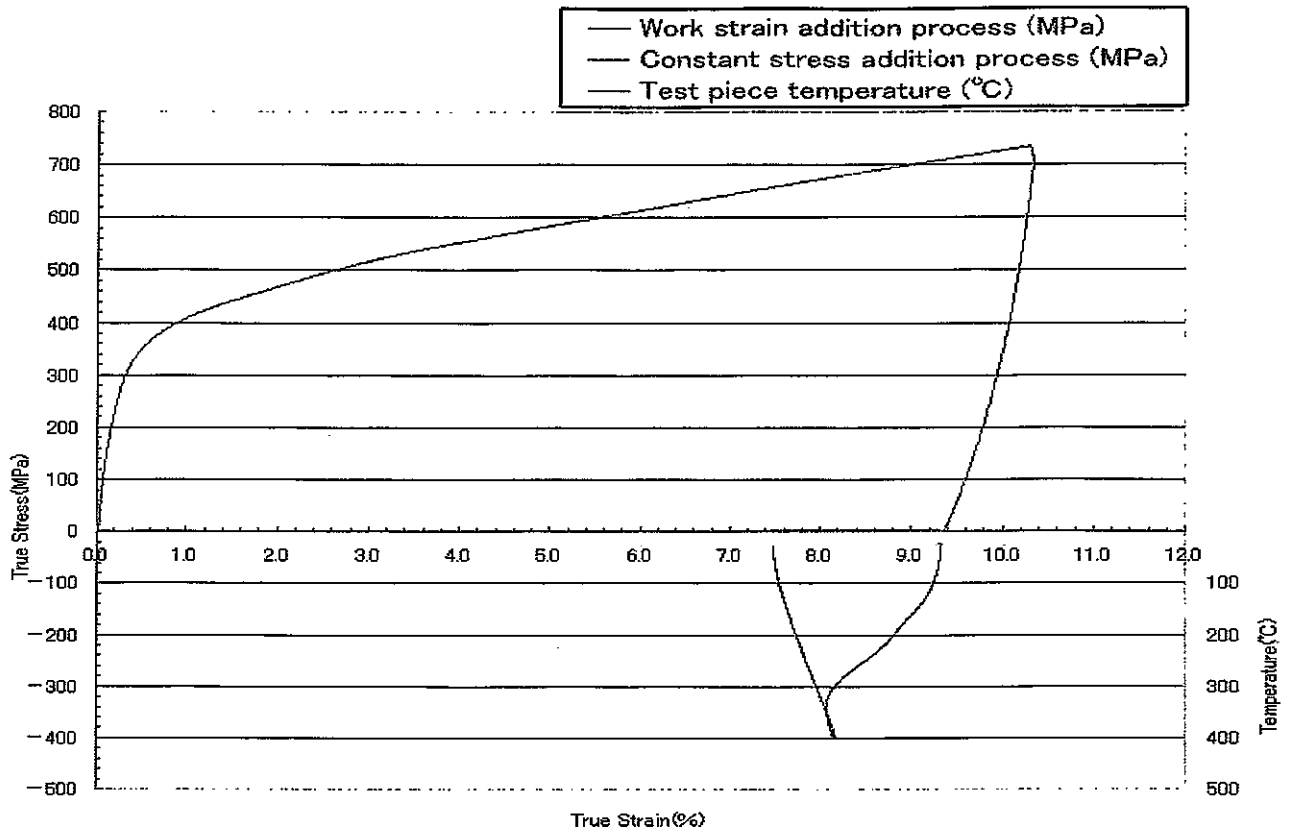


Fig. 4-13 Stress-strain-temperature diagram at 0 MPa tensile constant stress test for FSMA with 10% tensile work strain
10%引張加工ひずみ材の0 MPa 引張定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

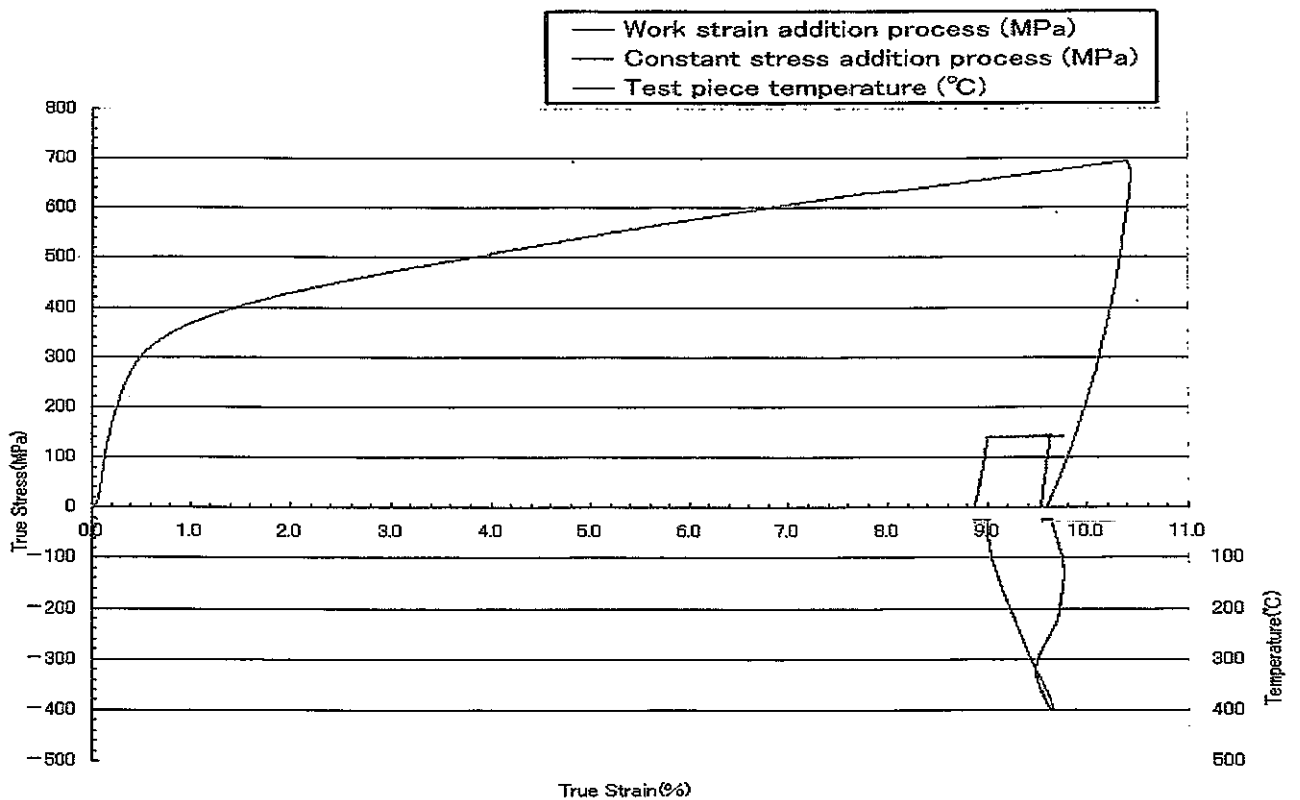


Fig. 4-14 Stress-strain-temperature diagram at 140 MPa tensile constant stress test for FSMA with 10% tensile work strain
10%引張加工ひずみ材の140 MPa 引張定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

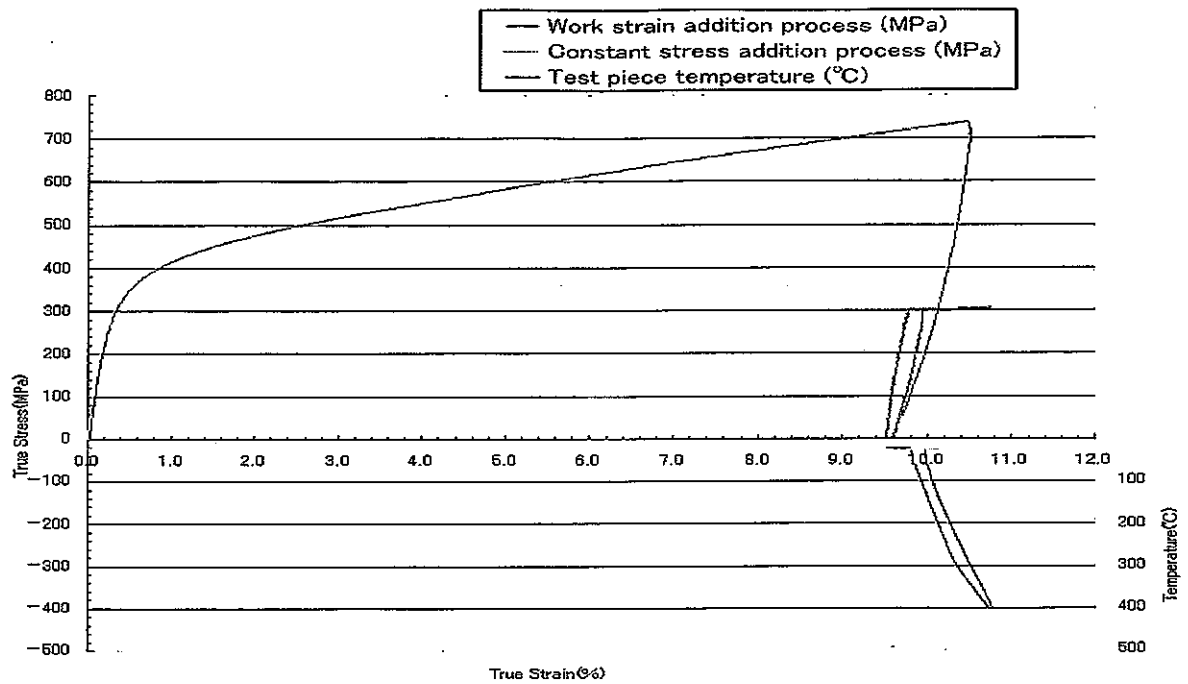


Fig. 4-15 Stress-strain-temperature diagram at 300 MPa tensile constant stress test for FSMA with 10% tensile work strain
10%引張加工ひずみ材の300 MPa引張定応力試験における応力—ひずみ—温度線図

⑤ 応力—ひずみ—温度線図の考察

Fig. 4-7 から Fig. 4-15 に示した応力—ひずみ—温度線図について考察する。

いずれの線図においても形状回復挙動を呈する 150°C前後までは、熱膨張によるひずみ増加が見られるが、その後 300°Cまでは加熱により形状回復を生じて、ひずみは減少している。さらに 400°Cまでの加熱により熱膨張によりひずみは増加し、その後の冷却による熱収縮で、ひずみは減少していくという一連の挙動が示されている。

4. 4. 2 単軸圧縮定応力下の記憶特性

圧縮加工ひずみまたは引張加工ひずみを付与した後、圧縮応力下で形状記憶処理をおこなった場合の形状記憶特性を調査した。

(1) 単軸圧縮加工ひずみを付与した場合の単軸圧縮定応力下の記憶特性

(i) 試験方法

試験片形状は直径 8 mm×長さ 12 mmの円柱状であり、丸棒素材から製作した。圧縮試験機により円柱試験片に常温でそれぞれ目標加工ひずみ-3%、-5%および-10%の圧縮加工ひずみを与えた後、除荷した。圧縮加工ひずみを付与した試験材に常温で所定の単軸圧縮応力を付加した後、試験機に付属した加熱装置で 400°Cの温度に加熱し、ひずみがほぼ一定値になるまで炉内で保持した後常温まで冷却し、除荷した。付加する圧縮応力は各加工ひずみ水準につきそれぞれ、0MPa、141MPa および 354MPa とした。

ひずみの測定は試験機に付属した差動トランスによる方法と試験前後の試験片長さの測定から算出する方法の2つの方法とした。測定された圧縮加工ひずみは、Table 4-5 に示すように 3%目標加工ひずみでは 2.34、2.86 および 2.89%、5%加工ひずみ材で 5.16、4.46 および 4.70%であり、10%加工ひずみ材で 9.97、9.77 および 10.31%である。

(ii) 試験結果

圧縮加工ひずみを-3%、-5%、-10%とし、圧縮定応力を-0MPa、約-150MPa、約-375MPaとした場合の形状記憶特性に及ぼす影響調査し、試験結果を Table 4-5 および Fig. 4-16~Fig. 4-25 に示す。

①形状回復ひずみに及ぼす単軸圧縮加工ひずみと単軸圧縮定応力の影響

Table 4-5 と Fig. 4-17 に形状回復ひずみに及ぼす単軸圧縮加工ひずみと単軸圧縮定応力の影響を示した。ここで用いた形状回復ひずみは試験前後の試験片高さから求めた値である。圧縮加工ひずみにおける形状回復ひずみは、方向は逆であるが、引張試験材とほぼ同じ傾向を示し、400℃までの加熱中にその大部分が発生する。付加する圧縮応力が増加するにつれて形状回復ひずみが減少するが、圧縮加工ひずみの影響は引張試験材ほど顕著でない。

付加した圧縮応力 0MPa での形状回復ひずみは-3%加工ひずみで 1.21%、-5%加工ひずみで 1.64%および-10%加工ひずみでは 1.35%で、5%加工ひずみの場合がもっとも大きい。

付加した圧縮応力-141MPa での形状回復ひずみは-3%加工ひずみで 0.75%、-5%加工ひずみで 0.57%および-10%加工ひずみでは 0.45%で、圧縮応力 0MPa 場合に比べて形状回復ひずみは減少している。

付加した圧縮応力-354MPa での形状回復ひずみは-3%加工ひずみで-0.28%、-5%加工ひずみ材で-0.07%および-10%加工ひずみ材では 0.07%で、形状記憶特性がほとんど発現していない。

圧縮試験材の 0.2%耐力は平均約 375MPa (363~389MPa) であり、この値は引張試験材の 0.2%耐力 (260~332MPa, 平均値で約 300MPa) に比べて約 75MPa 大きい。

Table 4-5 Results of compressive constant stress test after compressive work strain applied
単軸圧縮加工ひずみ材の単軸圧縮定応力試験の結果

TP-No	目標		初期値		圧縮加工ひずみ付与後					圧縮定応力試験後		
	加工ひずみ (%)	応力 (MPa)	L0 (mm)	d0 (mm)	L1 (mm)	d1 (mm)	L1-L0 (mm)	加工ひずみ (%)	0.2%Y.S (MPa)	L2 (mm)	L2-L1 (mm)	ひずみ (%)
C10	3	0	12.034	7.988	11.753	8.084	-0.281	-2.34	382	11.895	0.142	1.21
C9		-141	12.043	7.955	11.695	8.082	-0.348	-2.89	363	11.783	0.088	0.75
C8		-354	12.042	7.954	11.698	8.080	-0.344	-2.86	384	11.665	-0.033	-0.28
C7	5	0	12.041	7.966	11.42	8.178	-0.621	-5.16	370	11.607	0.187	1.64
C6		-141	12.026	7.914	11.49	8.094	-0.536	-4.46	376	11.556	0.066	0.57
C5		-354	12.039	7.992	11.473	8.186	-0.566	-4.70	370	11.465	-0.008	-0.07
C2	10	0	12.035	7.922	10.835	8.352	-1.200	-9.97	389	10.981	0.146	1.35
C3		-141	12.024	7.944	10.849	8.446	-1.175	-9.77	366	10.898	0.049	0.45
C11		-354	12.037	7.924	10.796	8.448	-1.241	-10.31	375	10.804	0.008	0.07

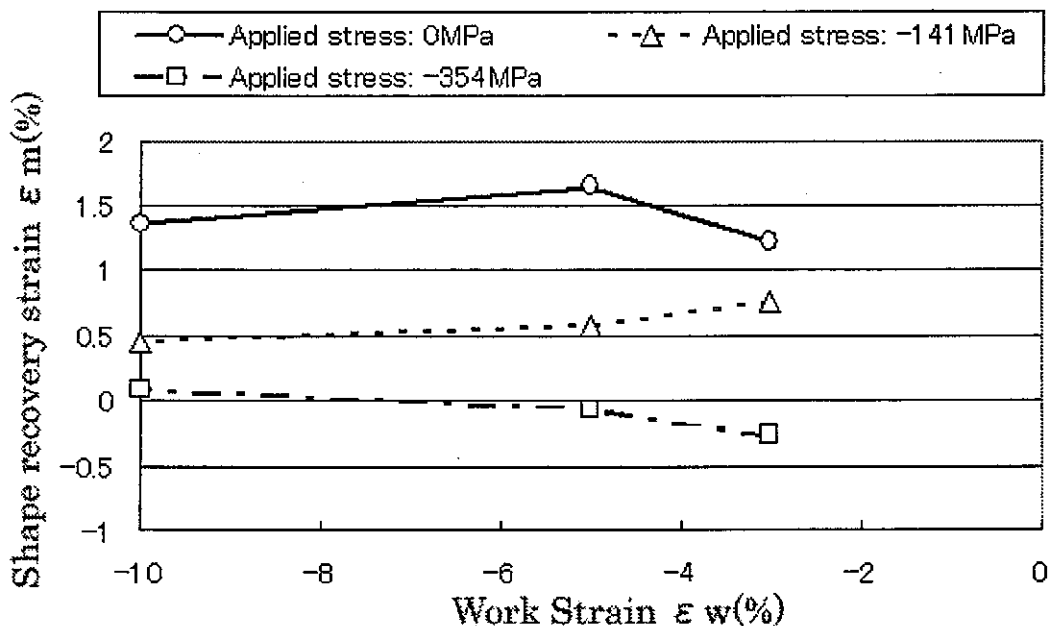


Fig. 4-16 Effects of compressive work strain and constant compressive stress on shape recovery strain
形状回復ひずみに及ぼす圧縮加工ひずみと圧縮定応力の影響

②応力-ひずみ-温度線図

3%圧縮加工ひずみにおける応力-ひずみ-温度線図を Fig. 4-17 から Fig. 4-19 に、5%圧縮加工ひずみにおける応力-ひずみ-温度線図を Fig. 4-20 から Fig. 4-22 に、10%圧縮加工ひずみにおける応力-ひずみ-温度線図を Fig. 4-23 から Fig. 4-25 に、それぞれ示した。なお本線図におけるひずみの値は圧縮実験装置に付属する長さ測定装置を用いて試験中に試験片の長さを計測して算出した値である。

いずれのケースにおいても、圧縮加工によりひずみは減少し（圧縮ひずみは増加し）、除荷によりひずみ増加がみられる。圧縮定応力付加によりひずみは圧縮応力のレベルに比例して減少し（圧縮ひずみは増加し）、次に圧縮定応力下の 400℃までの加熱によりひずみは増加し、その後 400℃からの冷却によりひずみは減少し、圧縮定応力除荷により圧縮応力のレベルに比例してひずみは約増加する。以上の減少は形状回復ひずみ、熱膨張ひずみと弾塑性加工ひずみが複合しており複雑な挙動を呈している。

本実験で得られた応力-ひずみ線図において、圧縮応力を付加あるいは除荷する際の線図の傾き（弾性係数に相当する値）は、引張試験の応力-ひずみ線図に比較して著しく小さい値である。この原因はいまだ明らかではないが、以下の理由が考えられる。(a)長さ測定装置が温度による器具の温度変化を充分には補償していない。(b)試験機の剛性に起因するひずみの変化を考慮できていない。

また本実験で得られた応力-ひずみ線図において、圧縮加工ひずみを付与した後除荷した際、応力が 0 MPa 近傍でひずみが 0% 近傍に接近する現象はグラフの図形処理の技術に起因していると考えている。

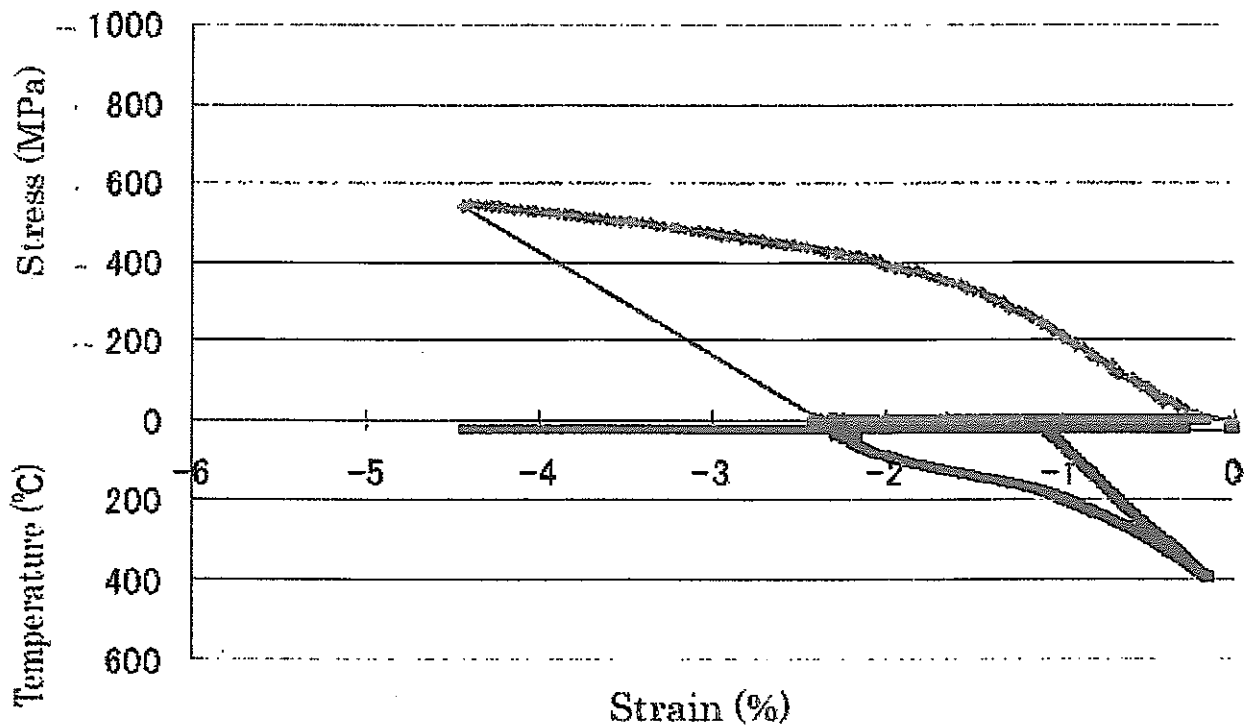


Fig. 4-17 Stress-strain-temperature diagram at 0 MPa compressive constant stress test for FSMA with 3% compressive work strain

3%圧縮加工ひずみ材の 0 MPa 圧縮定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

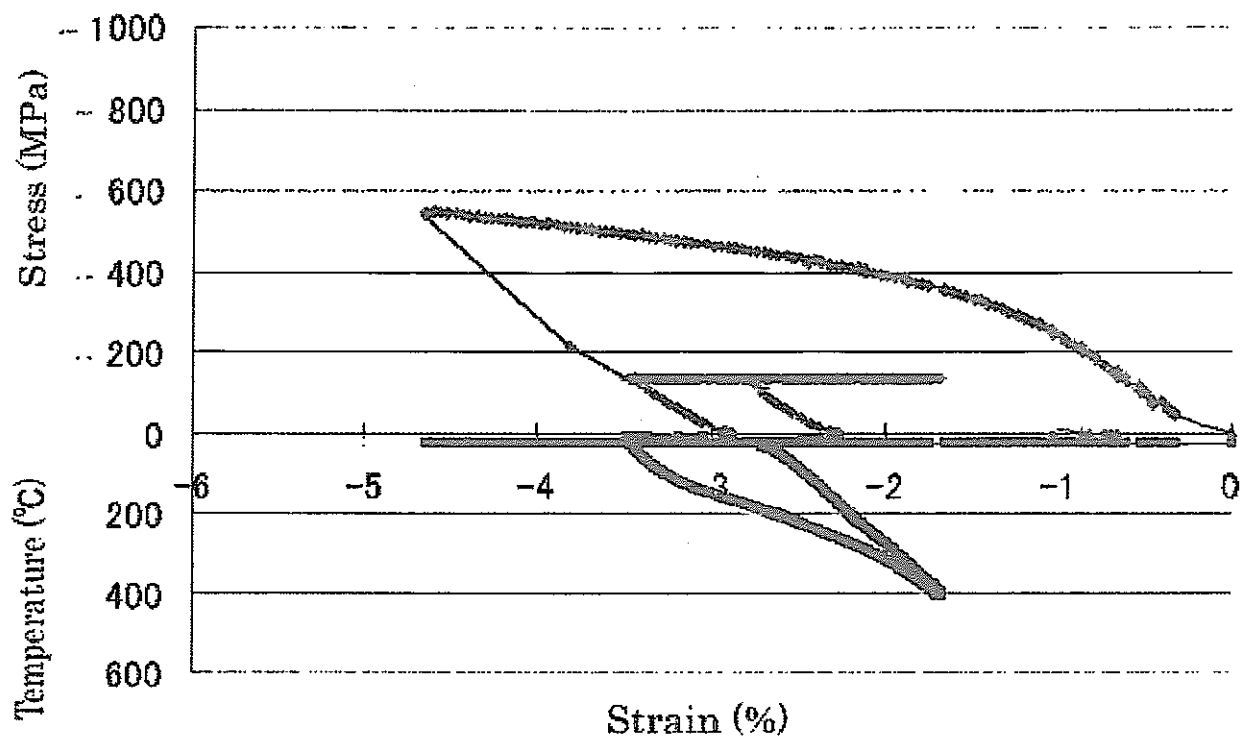


Fig. 4-18 Stress-strain-temperature diagram at 141MPa compressive constant stress test for FSMA with 3% compressive work strain
 3%圧縮加工ひずみ材の 141MPa 圧縮定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

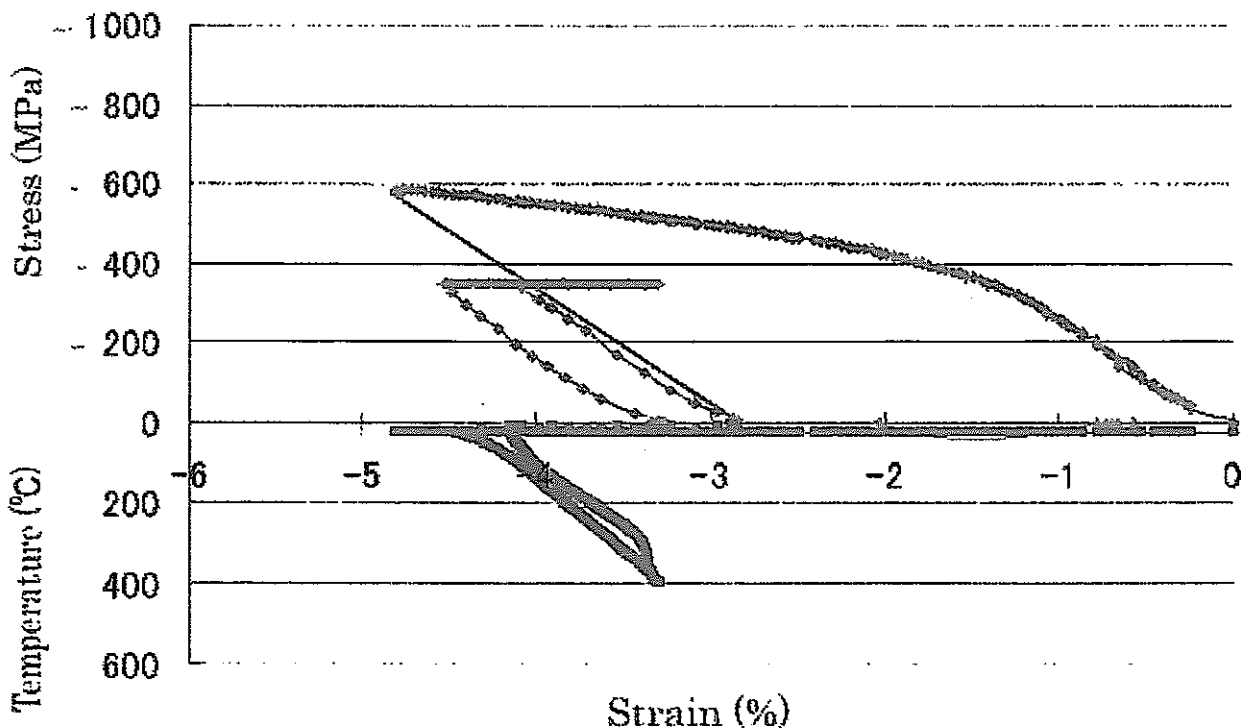


Fig. 4-19 Stress-strain-temperature diagram at 354MPa compressive constant stress test for FSMA with 3% compressive work strain
 3%圧縮加工ひずみ材の 354MPa 圧縮定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

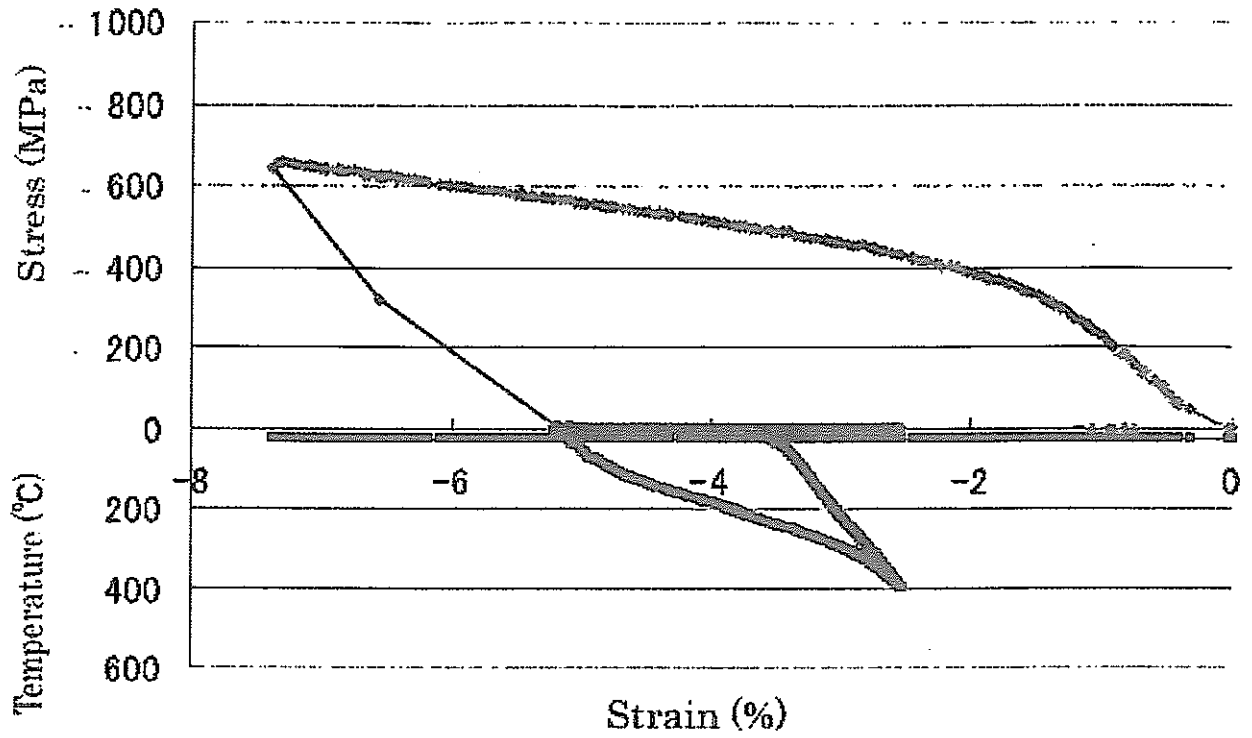


Fig. 4-20 Stress-strain-temperature diagram at 0 MPa compressive constant stress test for FSMA with 5% compressive work strain
5%圧縮加工ひずみ材の0 MPa 圧縮定応力試験における応力—ひずみ—温度線図

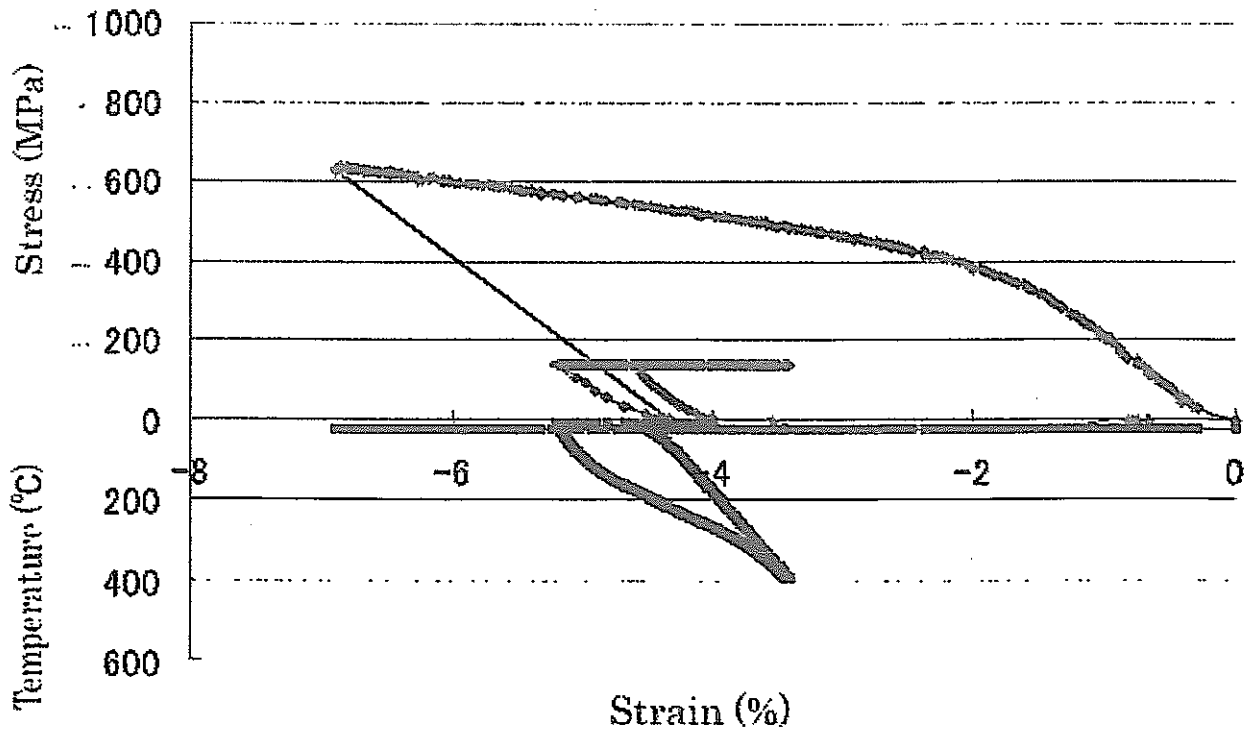


Fig. 4-21 Stress-strain-temperature diagram at 141MPa compressive constant stress test for FSMA with 5% compressive work strain
5%圧縮加工ひずみ材の141MPa 圧縮定応力試験における応力—ひずみ—温度線図

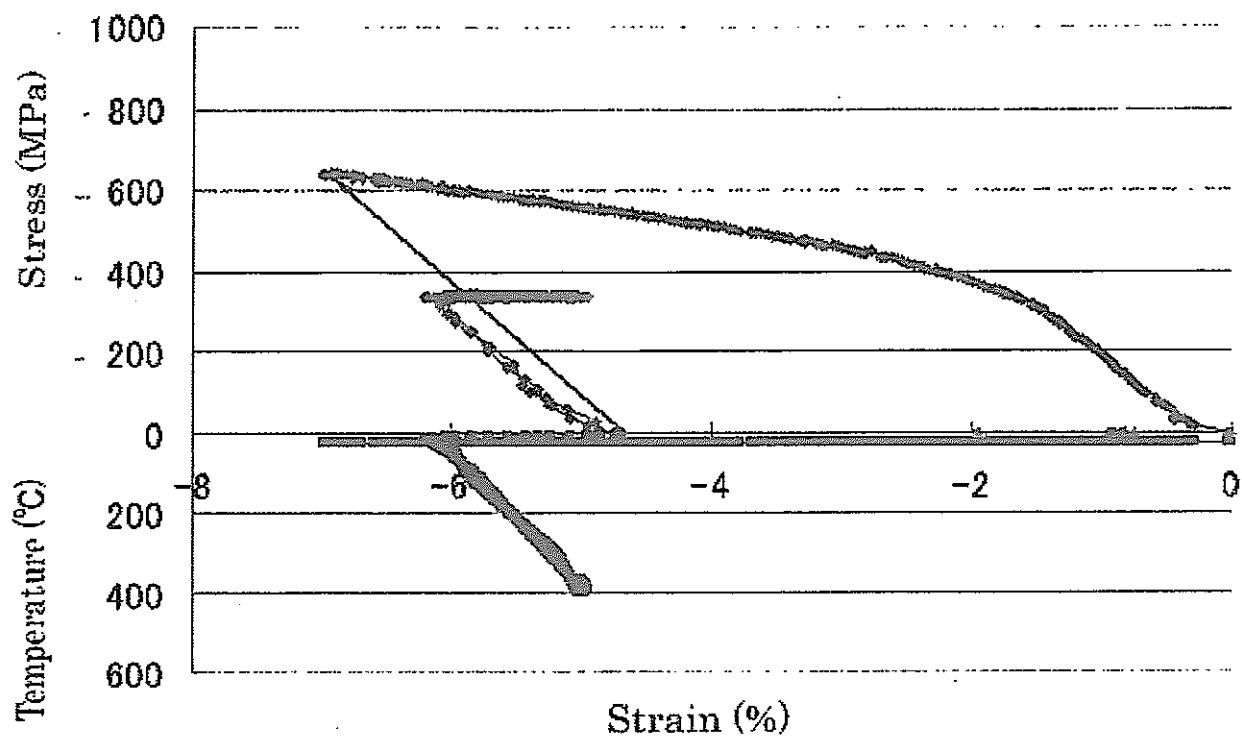


Fig. 4-22 Stress-strain-temperature diagram at 354MPa compressive constant stress test for FSMA with 5% compressive work strain
5%圧縮加工ひずみ材の354MPa圧縮定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

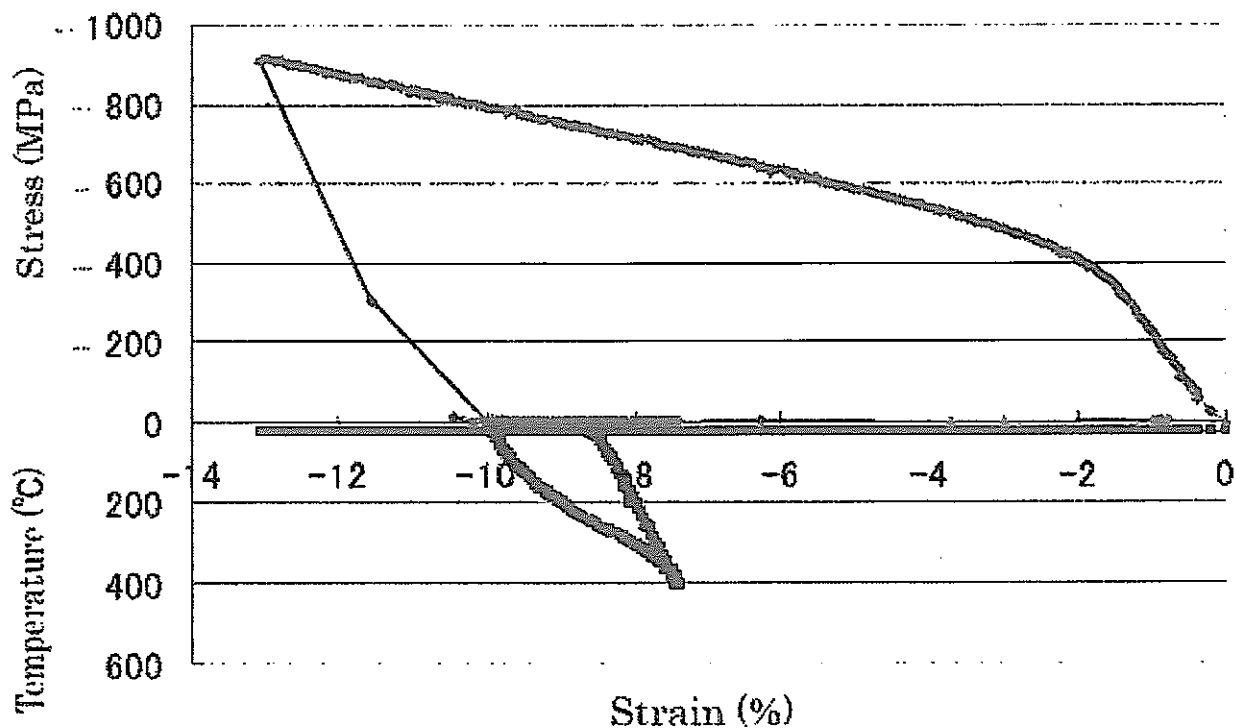


Fig. 4-23 Stress-strain-temperature diagram at 0 MPa compressive constant stress test for FSMA with 10% compressive work strain
10%圧縮加工ひずみ材の0MPa圧縮定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

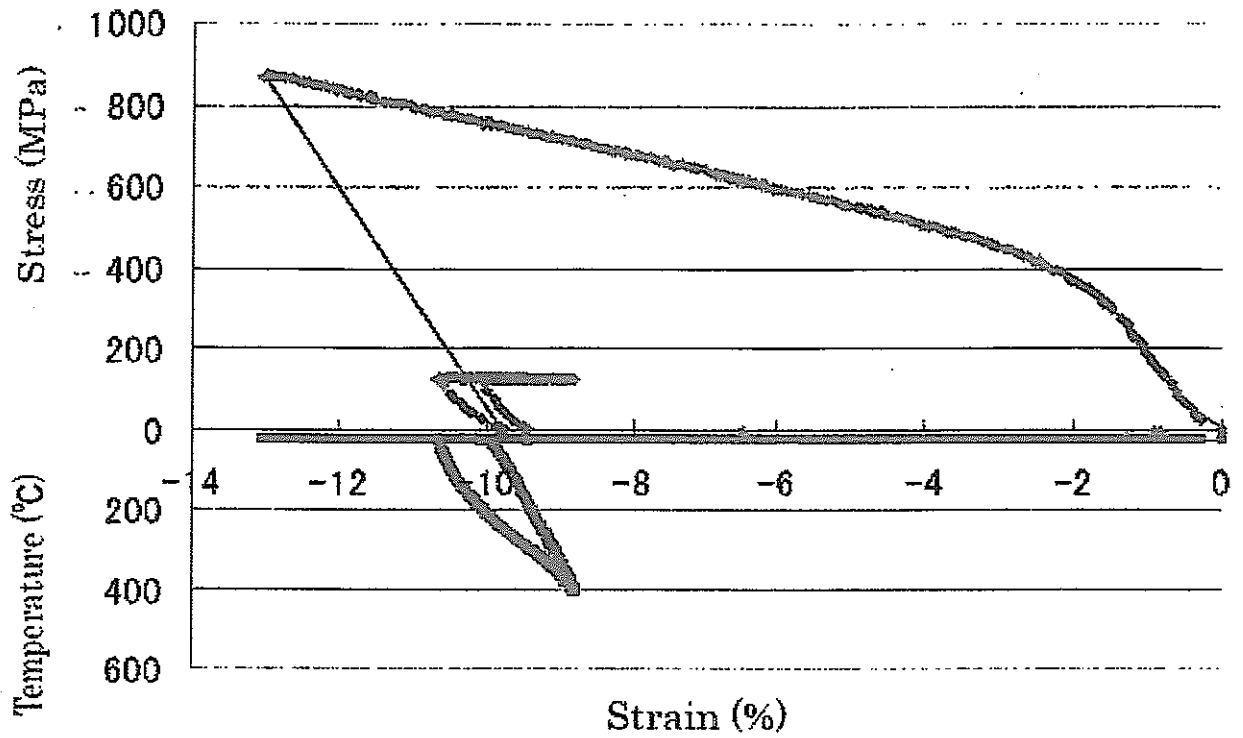


Fig. 4-24 Stress-strain-temperature diagram at 141MPa compressive constant stress test for FSMA with 10% compressive work strain
 10%圧縮加工ひずみ材の 141MPa 圧縮定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

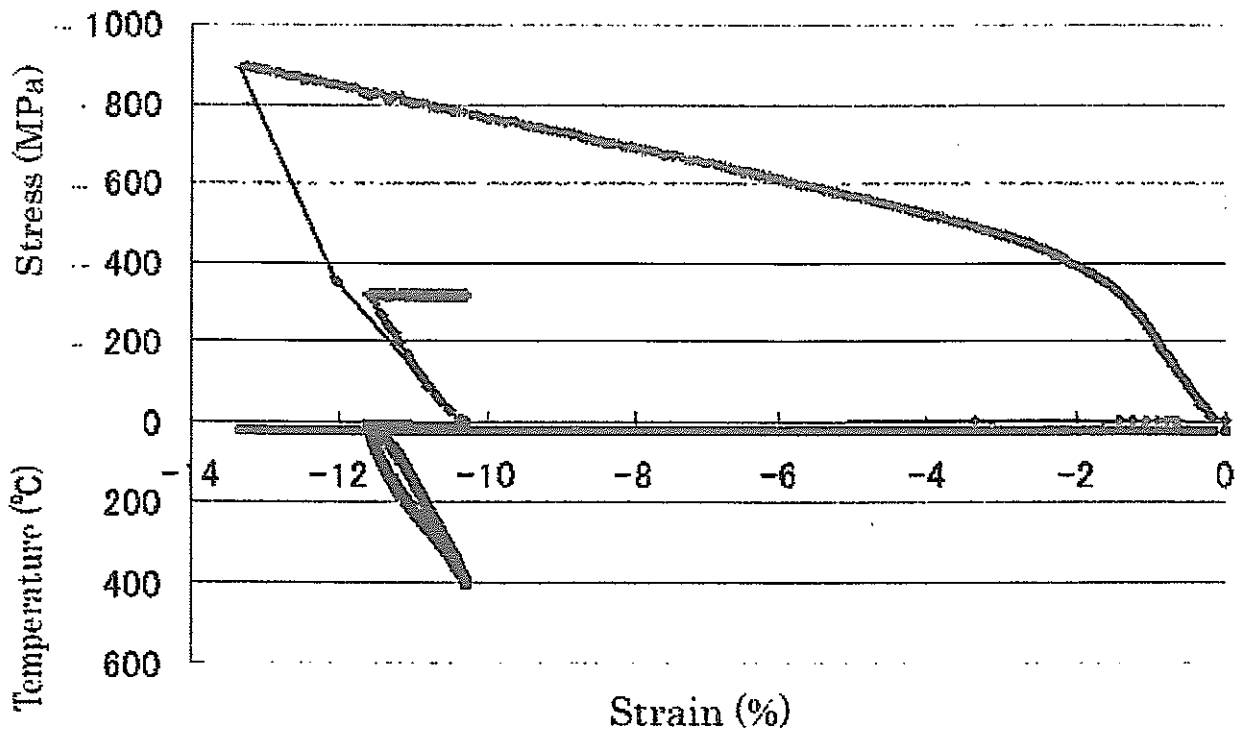


Fig. 4-25 Stress-strain-temperature diagram at 354MPa compressive constant stress test for FSMA with 10% compressive work strain
 10%圧縮加工ひずみ材の 354MPa 圧縮定応力試験における応力-ひずみ-温度線図

(2) 単軸引張加工ひずみを付与した場合の単軸圧縮定応力下の記憶特性

引張加工ひずみを付与した後、圧縮応力下で形状記憶処理をおこなった場合の形状記憶特性を調査した。

(i) 試験方法

試験片は、丸棒試験素材より製作した高温引張試験片Ⅱ-8形(直径8mm, 標点距離40mm)とした。ここで試験片の直径は、圧縮試験の試験片と同じ寸法とした。

まず、単軸引張試験により常温で目標ひずみ3%、5%および10%の引張加工ひずみを与えた後、除荷した。次に、上記の引張加工ひずみ試験片の標点間の中央部から長さ12mmで切断し圧縮試験片を製作し、これを用いて圧縮試験機にて単軸圧縮定応力試験を行った。圧縮定応力試験は-70MPaおよび-140MPaの圧縮定応力を付加した後に400°Cに加熱・保持した状態でひずみがほぼ一定値になるのを確認し、その後に室温まで冷却、除荷した。

引張加工ひずみ試験では、試験片の円周方向4ヶ所で評点間距離GLの変化 ΔGL を遅くして計測してひずみを測定し、ひずみの値は4ヶ所の測定平均値を採用した。Table 4-6に示すように、3%加工ひずみ材の実績加工ひずみは3.11%および2.99%であり、5%加工ひずみ材の実績加工ひずみは5.17%および4.95%であり、また10%加工ひずみ材の実績加工ひずみは9.78%および10.24%である。

圧縮試験におけるひずみの測定は圧縮定応力試験中に試験片の長さを差動トランスで検出して測定した。これとは別に試験前後の試験片高さを測定してひずみを求めた。

(ii) 試験結果

引張加工ひずみを3%、5%、10%とし、圧縮定応力を、約-70MPa、約-140MPaとした場合の形状記憶特性に及ぼす影響調査し、試験結果をTable 4-6およびFig. 4-26~Fig. 4-33に示す。

①形状回復ひずみに及ぼす単軸引張加工ひずみと単軸圧縮定応力の影響

試験結果をTable 4-6およびFig. 4-26に示す。形状回復ひずみは引張加工ひずみおよび付加する圧縮定応力が増加するに従い増加する。

圧縮定応力が-70MPaにおける形状回復ひずみは3%加工ひずみで約0.9%、5%および10%加工ひずみで約1.3%である。形状回復ひずみは加工ひずみが3%から5%に増加すると増加するが、5%加工ひずみと10%加工ひずみとはほとんど差が認められない。

圧縮付加応力が-140MPaにおける形状回復ひずみは3%加工ひずみで約1.1%、5%加工ひずみで約1.8%および10%加工ひずみでは約2%である。形状回復ひずみは加工ひずみが3%から5%の間での変化が大きい。また10%加工ひずみ材は5%加工ひずみ材に比べてややひずみが増加する。

各加工ひずみ材の応力-ひずみ曲線から0.2%耐力を求めた結果、299~321MPa(平均で約313MPa)となった。この結果は従来の測定結果の約300MPaに比べてわずかに大きい値である。

Table 4-6 Results of compressive constant stress test after tensile work strain applied

単軸引張加工ひずみ材の単軸圧縮定応力試験の結果

TP-No	径 (mm)	試験前GL-L1(mm)					引張加工ひずみ付与後GL-L2(mm)					L2-L1	加工ひずみ(%)		0.2%YS (MPa)
		1	2	3	4	Ave	1	2	3	4	Ave		実績	目標	
R1	7.99	39.939	39.942	39.942	39.946	39.942	41.178	41.186	41.182	41.189	41.184	1.242	3.11	3.00	312
R2	8.01	39.931	39.939	39.939	39.935	39.936	41.139	41.128	41.129	41.130	41.132	1.196	2.99	3.00	310
R3	8.02	39.918	39.925	39.931	39.925	39.925	41.991	41.990	41.993	41.988	41.991	2.066	5.17	5.00	316
R4	8.01	39.946	39.935	39.933	39.945	39.940	41.928	41.933	41.895	41.905	41.915	1.976	4.95	5.00	319
R5	7.99	39.936	39.937	39.921	39.935	39.932	43.824	43.831	43.848	43.851	43.839	3.906	9.78	10.00	299
R6	7.98	39.929	39.928	39.928	39.926	39.928	44.027	44.028	44.013	43.996	44.016	4.088	10.24	10.00	321

TP-No	引張加工ひずみ (%)	加工ひずみ付与材寸法(mm)		試験後寸法(mm)		付加応力 (MPa)	形状回復 ひずみ(%)	引張加工ひずみ付与材の断面積		圧縮定応力試験材の断面積	
		直径	長さ	直径	長さ			面積比	減少率(%)	面積比	増加率(%)
R1	3.11	7.881	12.020	7.924	11.908	-70	-0.932	0.972	2.783	1.011	1.094
R2	2.99	7.933	11.945	7.973	11.813	-140	-1.105	0.980	1.962	1.010	1.011
R3	5.17	7.823	11.983	7.903	11.825	-70	-1.319	0.951	4.876	1.021	2.056
R4	4.95	7.846	11.867	7.933	11.651	-140	-1.820	0.959	4.077	1.022	2.230
R5	9.78	7.617	12.007	7.713	11.848	-70	-1.324	0.909	9.096	1.025	2.537
R6	10.24	7.599	12.021	7.709	11.777	-140	-2.030	0.905	9.525	1.029	2.916

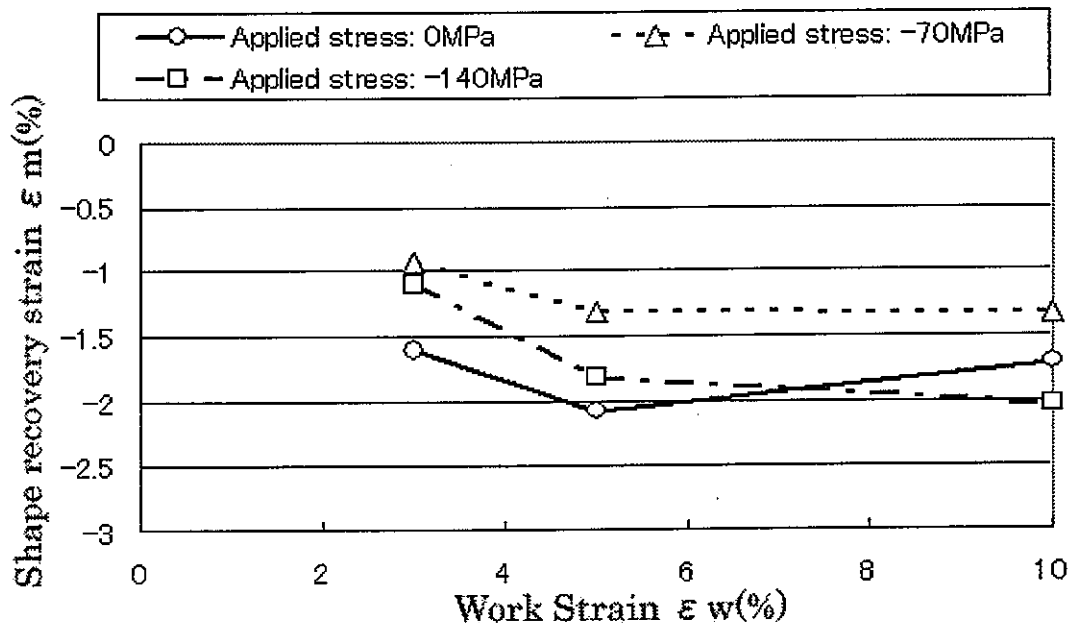


Fig. 4-26 Effects of tensile work strain and constant compressive stress on shape recovery memory strain
形状回復ひずみに及ぼす引張加工ひずみと圧縮定応力の影響

②応力-ひずみ-温度線図

3%引張加工ひずみにおける圧縮定応力-70MPaと-140MPaの応力-ひずみ-温度線図を Fig. 4-27 と Fig. 4-28 に、5%引張加工ひずみにおける圧縮定応力-70MPaと-140MPaの応力-ひずみ-温度線図を Fig. 4-29 と Fig. 4-30 に、10%引張加工ひずみにおける圧縮定応力-70MPaと-140MPaの応力-ひずみ-温度線図を Fig. 4-31 と Fig. 4-32 に、それぞれ示した。なお本線図におけるひずみの値は圧縮実験装置に付属する長さ測定装置を用いて試験中に試験片の長さを計測して算出した値である。

いずれの応力-ひずみ-温度線図においても常温で圧縮定応力を付加するとひずみは減少する。ひずみは加熱途中の約 120°Cまで増加し、約 140°C~250°C間で一旦減少した後、約 250~400°Cまでの間で再び増加する。その後ひずみは冷却中で減少し、冷却後の除荷時に増大する。

応力-ひずみ-温度線図の圧縮定応力を常温で付加する場合、ひずみは定応力が減少すると減少する。また引張加工ひずみが3%と5%とではひずみの差はほとんど認められない。

応力-ひずみ-温度線図において圧縮定応力で約 120°Cまで加熱する場合、ひずみの増大は10%加工ひずみでやや大きく、圧縮定応力-140MPaの場合は-70MPa材に比べて小さい傾向が認め

られる。

応力-ひずみ-温度線図において約 140℃~250℃間で、引張加工ひずみおよび圧縮定応力が増加するとひずみが減少する傾向が認められる。但し、10%加工ひずみの圧縮定応力-70MPa で観察されるひずみは5%引張加工ひずみのひずみとほとんど差がない。

なお、本実験で得られた応力-ひずみ線図においても、圧縮応力を付加あるいは除荷する際の線図の傾きが、引張試験の応力-ひずみ線図に比較して著しく小さい値である。同様に以下の理由が考えられる。(a)長さ測定装置が温度による器具の温度変化を充分には補償していない。(b)試験機の剛性に起因するひずみの変化を考慮できていない。

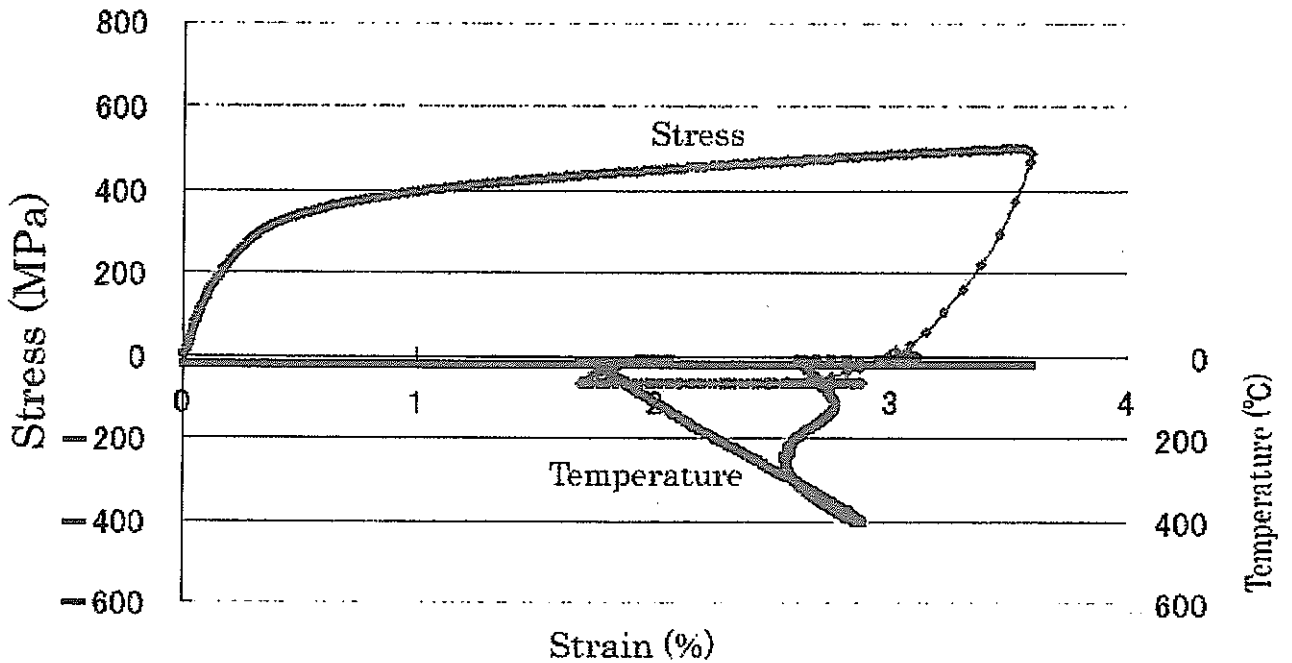


Fig. 4-27 Stress-strain-temperature diagram at 70MPa compressive constant stress test for FSMA with 3% work strain
 3%引張加工ひずみ材の70MPa圧縮定応力試験応力-ひずみ-温度線図

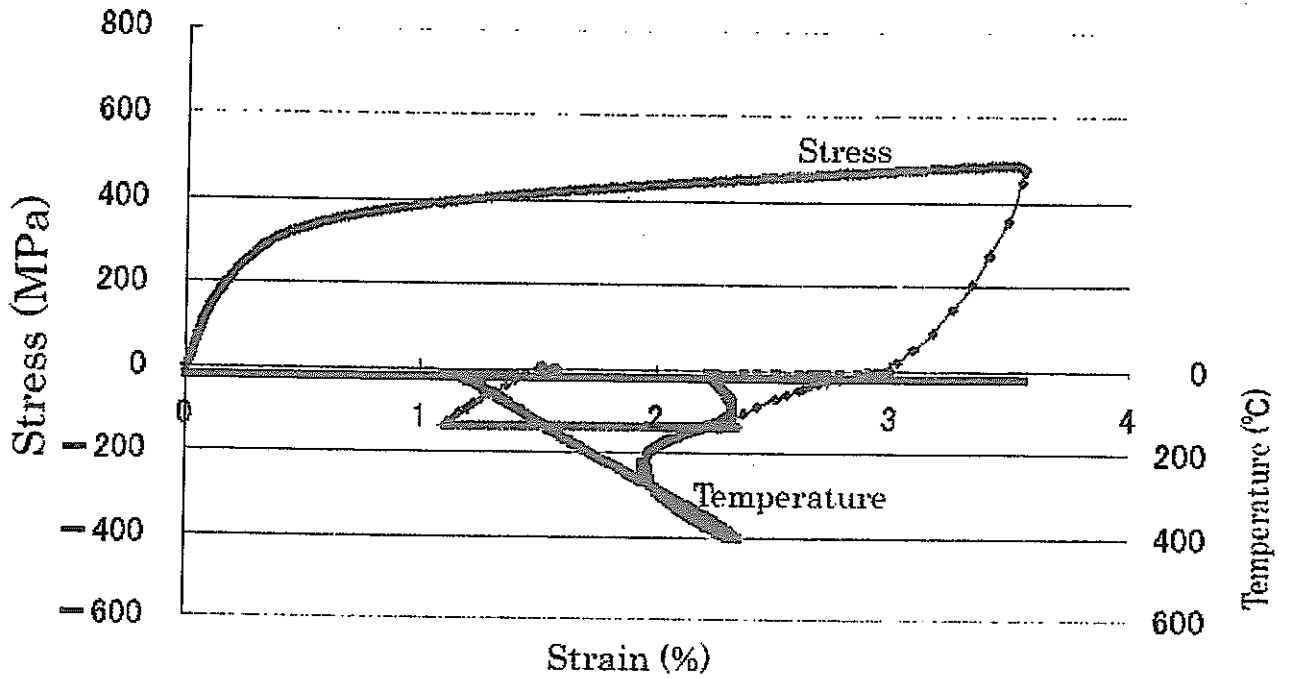


Fig. 4-28 Stress-strain-temperature diagram at 140MPa compressive constant stress test for FSMA which was given 3% work strain
 3%引張加工ひずみ材の140MPa圧縮定応力試験応力—ひずみ—温度線図

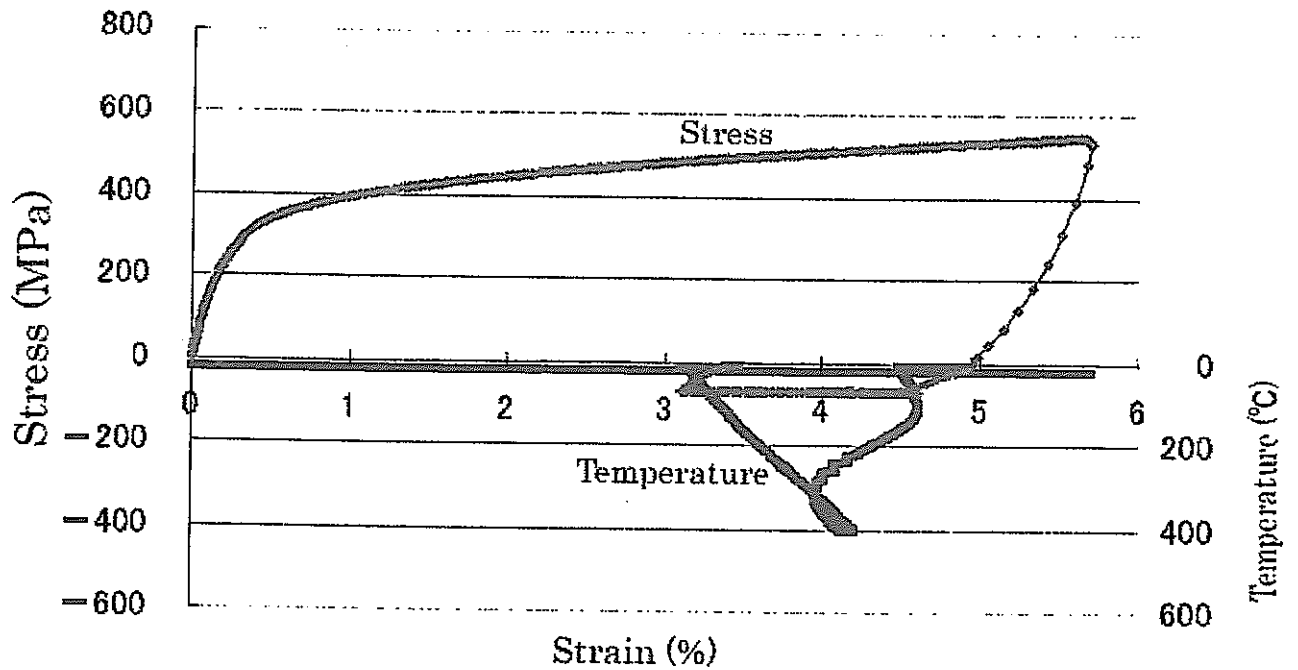


Fig. 4-29 Stress-strain-temperature diagram at 70MPa compressive constant stress test for FSMA which was given 5% work strain
 5%引張加工ひずみ材の70MPa圧縮定応力試験応力—ひずみ—温度線図

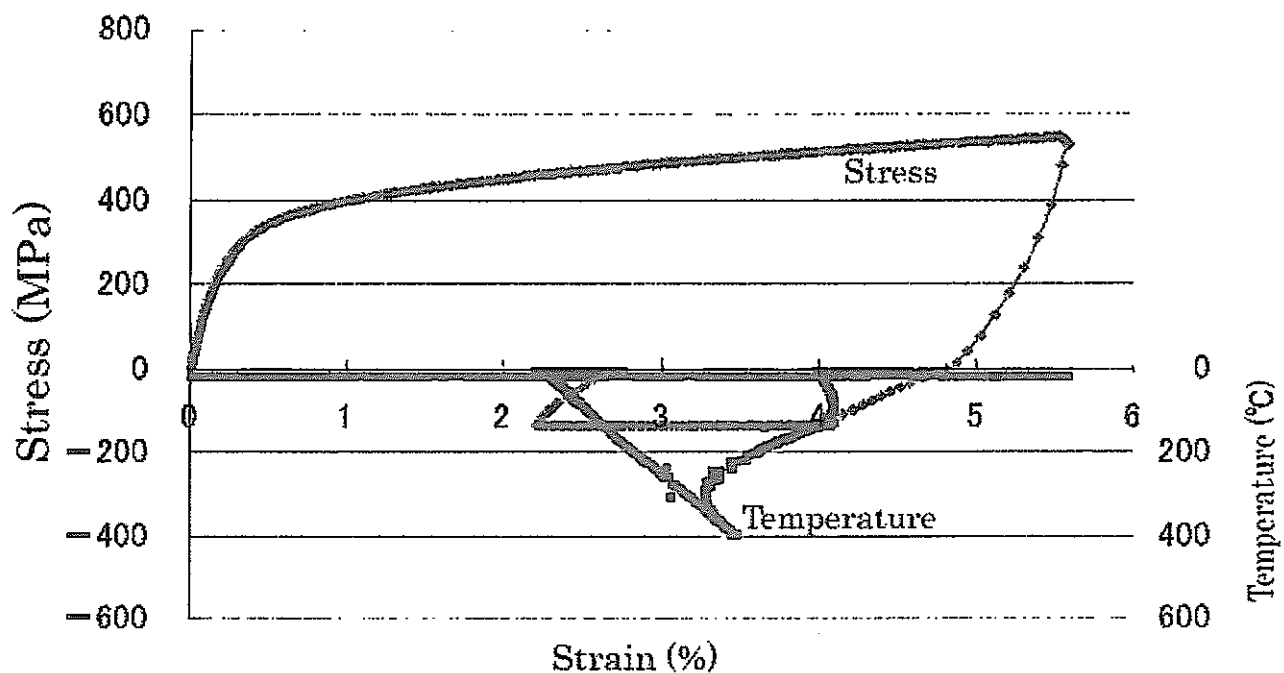


Fig. 4-30 Stress-strain-temperature diagram at 140MPa compressive constant stress test for FSMA which was given 5% work strain
5%引張加工ひずみ材の140MPa圧縮定応力試験応力-ひずみ-温度線図

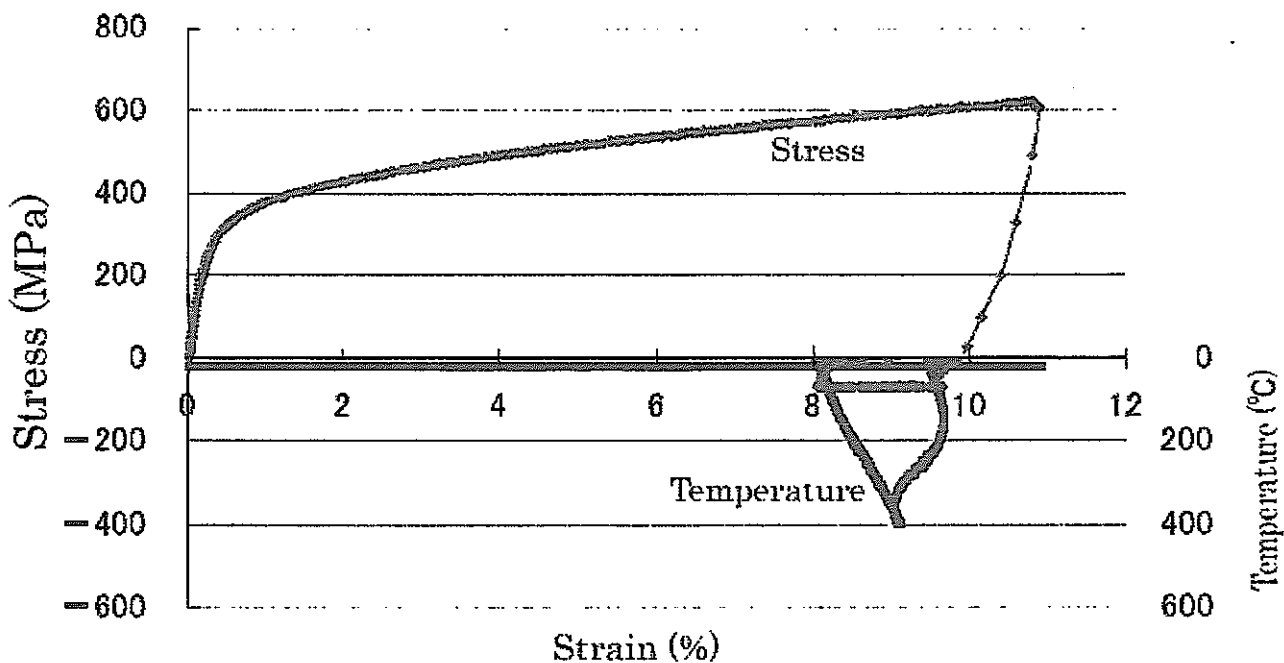


Fig. 4-31 Stress-strain-temperature diagram at 70MPa compressive constant stress test for FSMA which was given 10% work strain
10%引張加工ひずみ材の70MPa圧縮定応力試験応力-ひずみ-温度線図

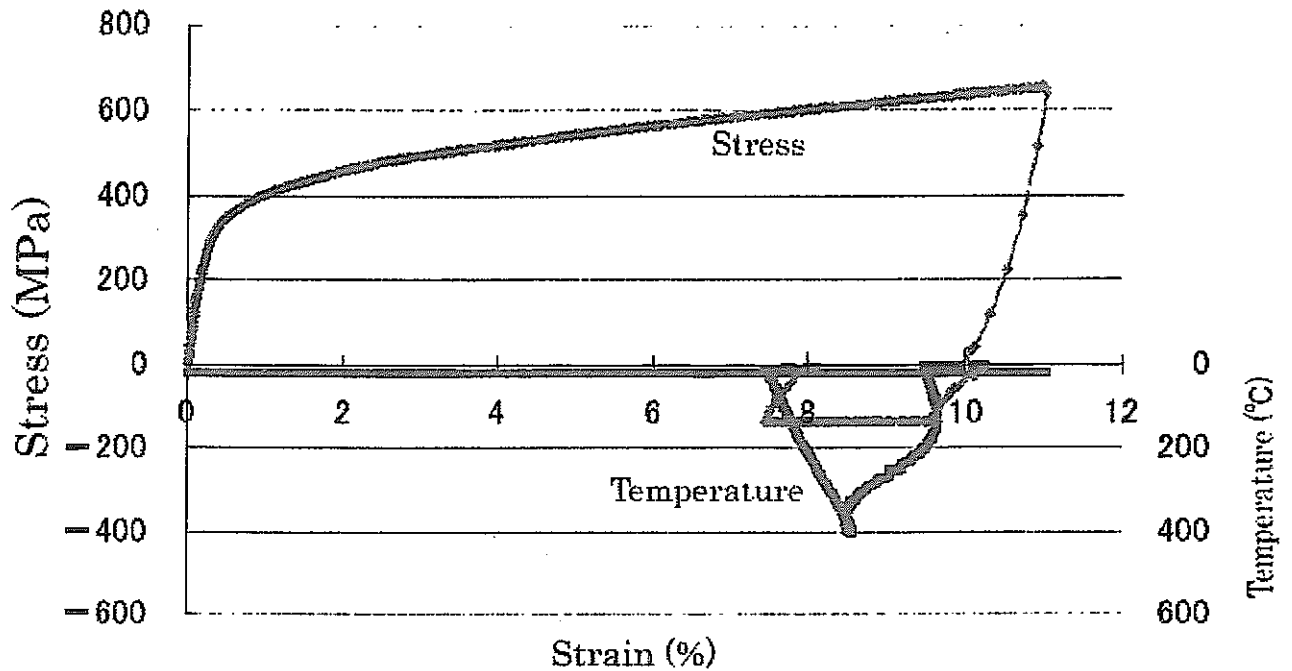


Fig. 4-32 Stress-strain-temperature diagram at 140MPa constant compressive stress test for FSMA which was given 5% work strain
 10%引張加工ひずみ材の140MPa圧縮定応力試験応力—ひずみ—温度線図

4. 4. 3 応力の影響

形状回復ひずみにおよぼす応力の影響を，付加定応力と形状回復率との関係として Fig. 4-33 に示した。

(1) 引張加工ひずみを付与する場合における引張定応力と圧縮定応力の影響

3%，5%から10%の引張加工ひずみを付与する場合における応力の影響は Fig.4-33 の記号●，▲，■でそれぞれ示した。応力を付与せず形状回復処理を行う場合，形状回復によるひずみは圧縮となる。引張定応力を増加すると，圧縮方向に働く形状回復挙動が阻害され，形状回復率が減少する。さらに300MPa以上の領域においては，材料の塑性変形により形状回復率が大きなマイナスの値となる。圧縮定応力を付与すると，形状回復挙動を促進する方向に応力が働くため，形状回復挙動は引張定応力の場合と傾向が異なる。

(2) 圧縮加工ひずみを付与する場合における圧縮定応力の影響

3%，5%から10%の引張加工ひずみを付与する場合における応力の影響は Fig.4-33 の記号○，△，□でそれぞれ示した。応力を付与せず形状回復処理を行う場合，形状回復によるひずみは引張となる。圧縮定応力を付与すると引張の形状回復挙動を阻害する方向に働くため，応力の増加に伴い形状回復率は減少していく様子が認められる。

圧縮加工ひずみと形状回復率の関係では，圧縮加工ひずみが3%のときが最も良い回復率であり，5%，10%の加工ひずみ材で回復率は減少している。

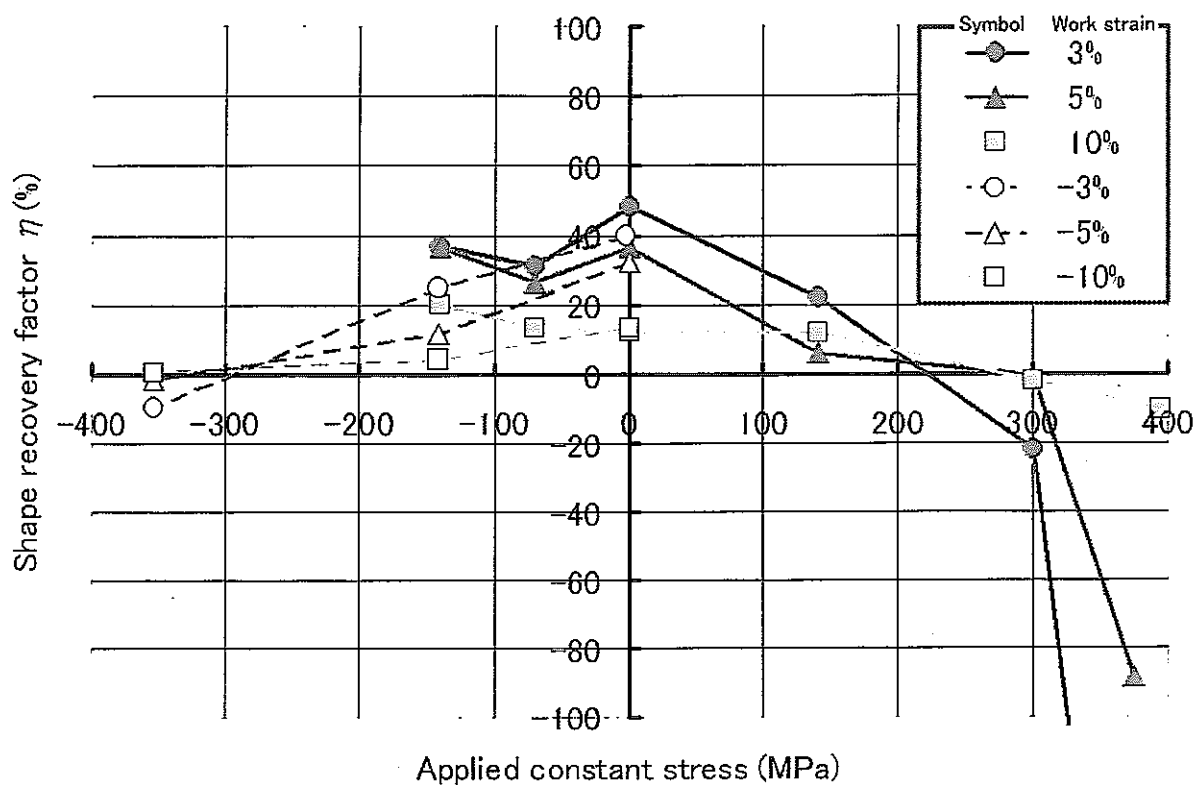


Fig. 4-33 Relation between work strain, applied constant stress and shape recovery factor
加工ひずみ, 付加定応力と形状回復率の関係

5 数値解析のための機械的特性のモデル化

5.1 考慮すべき因子

鉄系形状記憶合金(FSMA)の形状記憶特性をモデル化するに当たり、材料特性を支配する主要な因子として、加工ひずみ量、トレーニング効果、形状回復プロセスにおける応力、温度およびその変化率の5項目が考えられる。

加工ひずみ量およびトレーニング効果は特に回復ひずみ量に、回復プロセスにおける応力および温度変化率は回復ひずみ量と変態点に、そして温度は応力-ひずみの関係や線膨張率に影響を及ぼすと考えられる。ただし、温度変化率については、模擬試験において温度変化率を変動させることは想定していないので、本研究の検討の範囲から除くこととする。

5.2 炉心変形模擬試験での試験体の変形挙動

模擬試験に用いる燃料集合体模擬試験体は、形状記憶処理を行ったのち、想定する初期形状に変形させたものである。模擬試験は、これらを試験装置にセットして温度を付加し、試験体の形状を回復させて全体の変形挙動を計測するものである。

試験体に形状記憶処理を行った段階(トレーニング効果に期待する場合は、トレーニング処理後に形状記憶処理を行った段階)で、その熱処理によって組織がオーステナイト相に安定するとともに内部応力が除去される。模擬試験のシミュレーションとしては、このあとの段階からスタートする必要がある。つまり、初期形状設定過程および形状回復過程である。初期形状設定過程では、形状記憶処理をして曲がった状態の試験体に荷重をかけて想定する初期形状(初期たわみを考慮する場合を除いて真直と考えてよい)を作る。このとき応力誘起マルテンサイト変態を生じるが、塑性変形の場合と同様、除荷時のスプリングバックを考慮する必要がある。この段階で、変形に対する釣合いのため、塑性変形の場合と同様、残留応力が生じる。次に、温度付加による変態開始・終了、さらに冷却までの形状回復過程であるが、模擬試験では、内部の力の釣合いおよび外荷重により、試験体は一般に応力変動下での形状回復となる。

5.3 材料特性のモデル化

模擬試験のシミュレーションのためには、前述の初期形状設定過程と形状回復過程を実用上十分な精度で表現できる FSMA 材料特性のモデル化が必要となる。

5.3.1 初期形状設定過程

形状記憶処理を行った試験体に荷重を付加してその後除荷を行うと、試験体はスプリングバックにより若干変形が回復し、内部には残留応力が生じる。このスプリングバックを見込んで初期形状を設定する。この過程は、Fig. 5-1 に示すように、応力-ひずみ関係において弾塑性挙動のアナロジーとして表現できる。

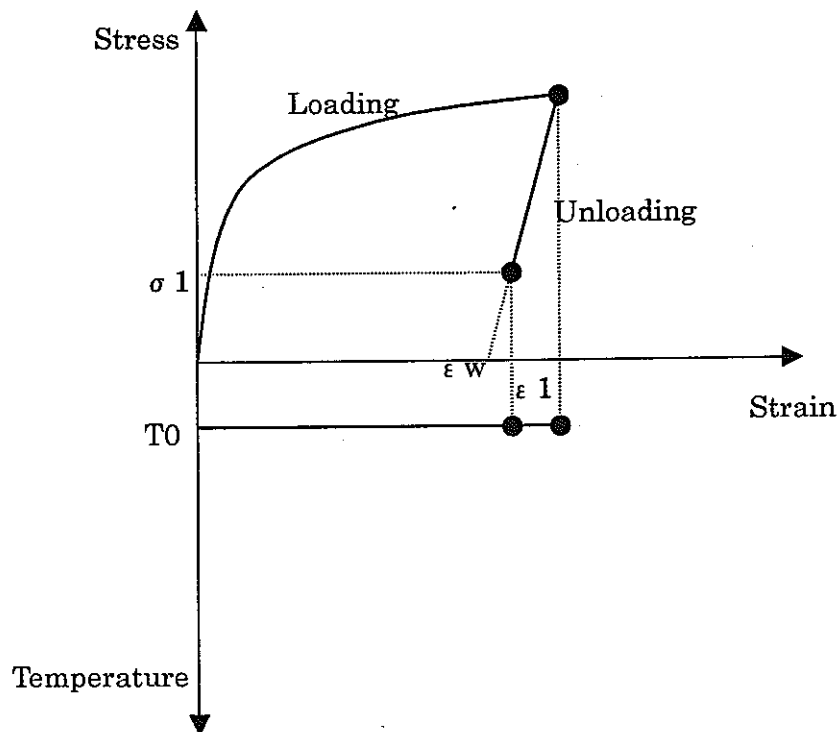


Fig. 5-1 Initial Configuration Forming Process
初期変形設定過程

5.3.2 形状回復過程

本過程では、Fig. 5-2 に示すように、温度上昇に伴って熱膨張と変態（形状回復）による変形を生じ、冷却によって熱収縮による変形を生じる。この間、応力は力の釣り合いから若干変動することが予想される。以下では、このような過程を考慮してモデル化を考える。

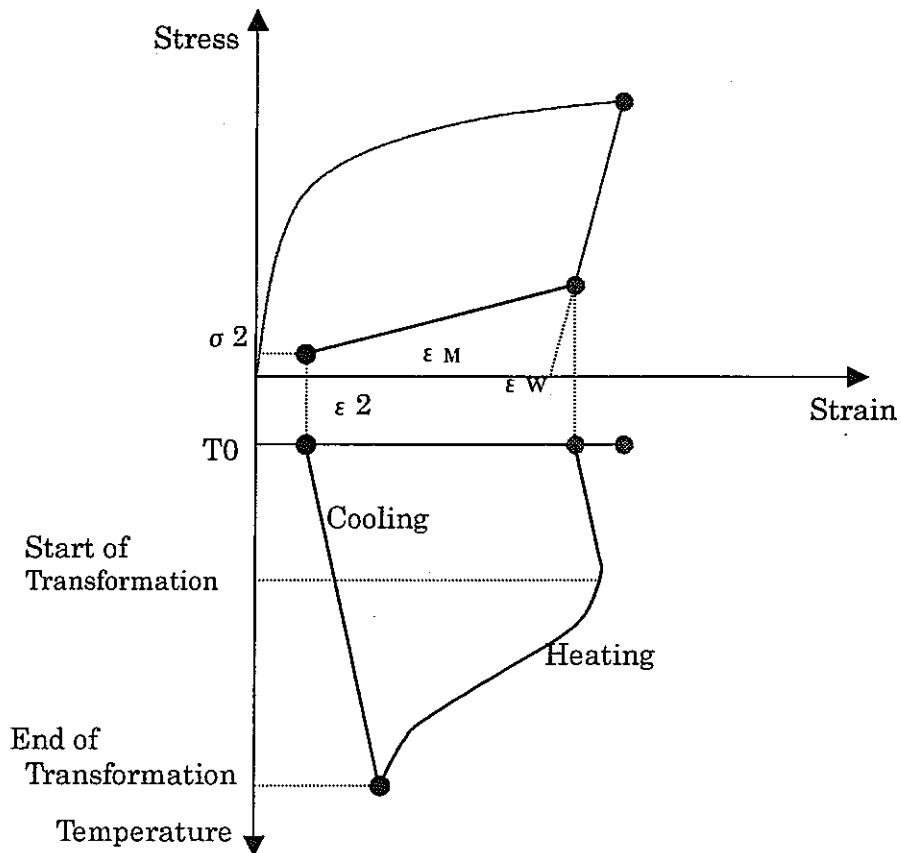


Fig. 5-2 Shape Recovery Process
形状回復過程

(1) トレーニング効果考慮を考慮した加工ひずみ ϵ_w と回復ひずみ ϵ_m の関係

加工ひずみ ϵ_w と回復ひずみ ϵ_m の関係は、概念的に Fig. 5-3 で表される。加工ひずみが大きくなると、回復ひずみも増加するが、途中から減少し始める。この特性は圧縮側でもほぼ同じであることが本研究における実験結果から分かっている。また、図に矢印で示すようにトレーニングにより、回復特性は向上する。

このような特徴を数式で表現することを考える。この際の条件として、回復ひずみは加工ひずみを超えないと考え、原点における勾配を1とする。関数としては、いろいろ考えられるが、最も単純なものは2次多項式であろう。Fig. 5-3 に2次多項式を採用した場合の式を示している。この場合、定めるべき係数は1つ (ϵ_0) であるが、圧縮側は別に関数を用意する必要がある。トレーニング材については、ピーク位置 (ϵ_0) が大きくなる。他に3次多項式を用いることも考えられる。この場合はひとつの関数で圧縮側も表現できる。以下に、これらを含めた関数の例を示す。なお、それらのピーク位置は $x = \pm a$ である。

$$f(x) = -\frac{1}{2a}x^2 + x \quad (5.1)$$

$$f(x) = -\frac{1}{3a^2}x^3 + x \quad (5.2)$$

$$f(x) = x \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2a^2}\right) \quad (5.3)$$

また、これらの式を仮定した場合の回復率($\eta = \epsilon_m / \epsilon_w$)は、次のとおりである。

$$\eta(\epsilon_w) = -\frac{\epsilon_w}{2a} + 1 \quad (5.4)$$

$$\eta(\epsilon_w) = -\frac{\epsilon_w^2}{3a^2} + 1 \quad (5.5)$$

$$\eta(\epsilon_w) = \exp\left(-\frac{\epsilon_w^2}{2a^2}\right) \quad (5.6)$$

これらを図示すると Fig. 5-4 のようになる。すべて加工ひずみ 0 で回復率は 1 となる。2 次多項式近似の場合は右下がりの直線、3 次多項式近似の場合は上に凸の放物線となる。

ひずみの回復に影響する因子として、応力が考えられるが、これについては後述の (3) で検討する。

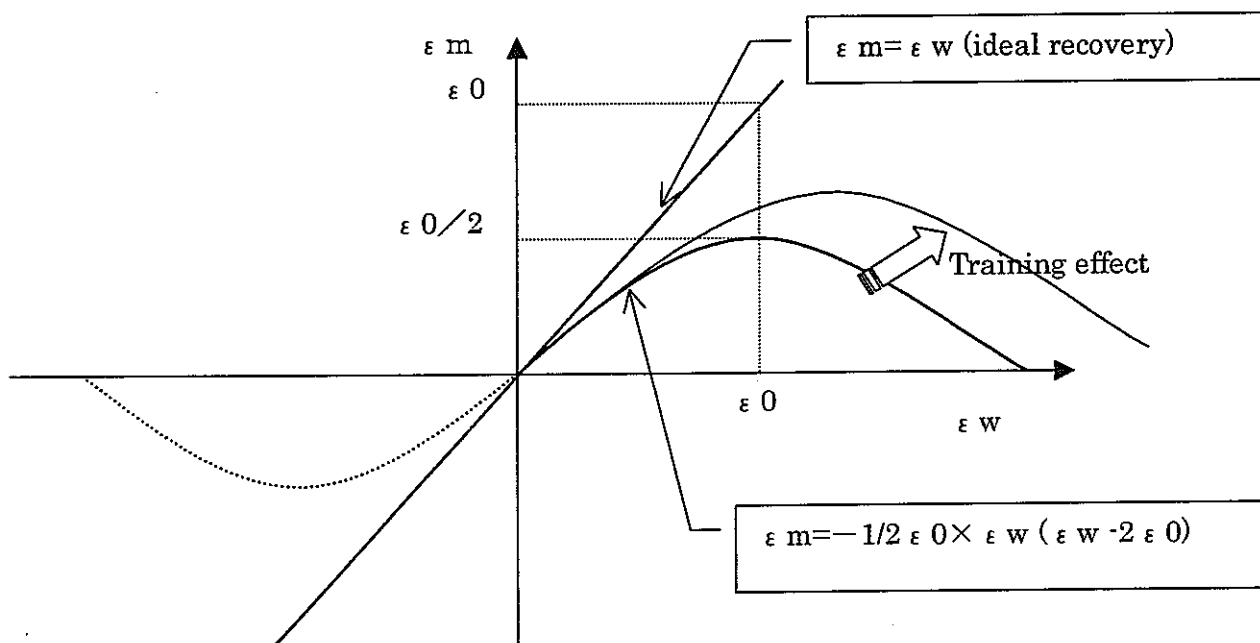


Fig. 5-3 Relation between Work strain and Recovery strain
加工ひずみと回復ひずみの関係

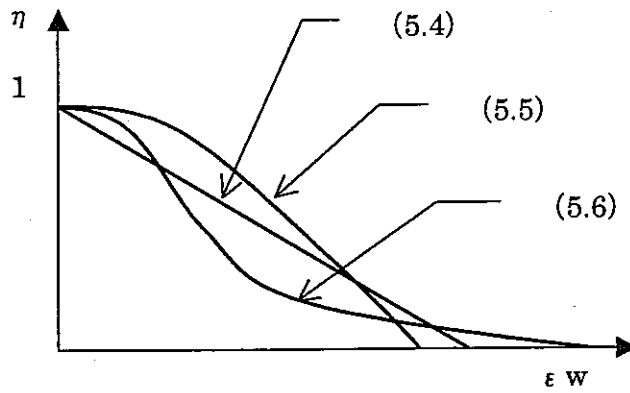


Fig. 5-4 Relation between Work Strain and Recovery Ratio
加工ひずみと回復率の関係

(2) 温度とひずみ(回復分)の関係

温度上昇にともなうひずみの回復の様子を適切にモデル化することは、FSMAによる模擬試験のシミュレーションにおいて重要である。この様子はおよそ Fig. 5-5 のように捉えることができると考えられる。

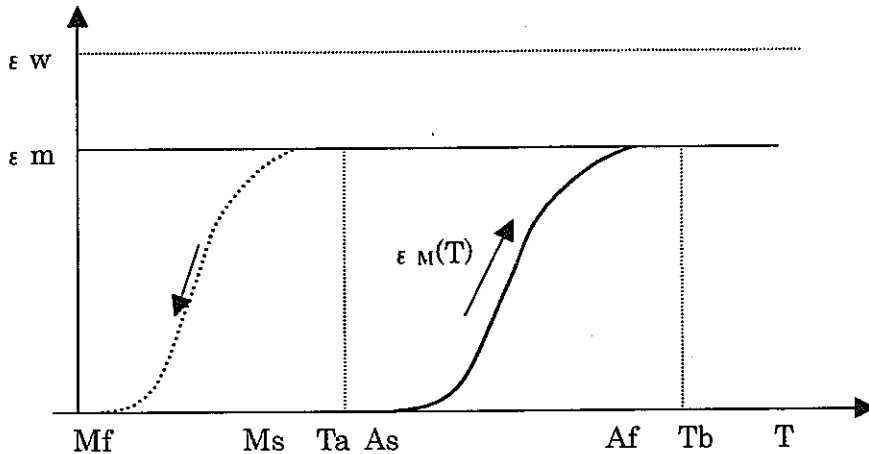


Fig. 5-5 Relation between Temperature and Recovery Strain
温度とひずみ(回復分)の関係

Fig. 5-5 において、 ϵ_w は加工ひずみ、 ϵ_m はこれに対して期待される回復ひずみ量である。太い実線は温度上昇とともに、組織がマルテンサイトからオーステナイトに変化してひずみが ϵ_m に到達するまでの変態に起因するひずみ挙動 $\epsilon_M(T)$ を示している。Ta は初期温度であり、Tb は昇温過程の最終温度である。Ms、Mf はマルテンサイト変態開始温度および終了温度、As、Af はオーステナイト変態開始温度および終了温度である。なお、応力が存在する場合、回復ひずみ量および変態点が見かけ上、影響を受けると考えられるが、これについては次の (3) で検討する。

ここでは、一例として3次多項式を用いた場合の式を提示する。境界条件として、オーステナイト変態開始点と終了点でのひずみ規定し、その温度微分値をゼロと仮定した。

$$\epsilon_M(T) = 0, \quad T_a \leq T \leq A_s \quad (5.7)$$

$$\epsilon_M(T) = \epsilon_m \left(\frac{T - A_s}{A_f - A_s} \right)^2 \left(3 - 2 \cdot \frac{T - A_s}{A_f - A_s} \right), \quad A_s \leq T \leq A_f \quad (5.8)$$

$$\epsilon_M(T) = \epsilon_m, \quad A_f \leq T \leq T_b \quad (5.9)$$

(3) 応力の影響

外部荷重等によって発生する応力の影響としては、変態開始および終了温度への影響および回復ひずみ量への影響が考えられる。

Fig. 5-6 は、オーステナイト変態開始点 A_s および終了点 A_f と応力の関係を概念的に示したものである。変態開始点 A_s および終了点 A_f を応力の関数として表現できれば、式(5.7)~(5.9)の温度と回復ひずみ量の関係において応力の影響を取り込むことができる。

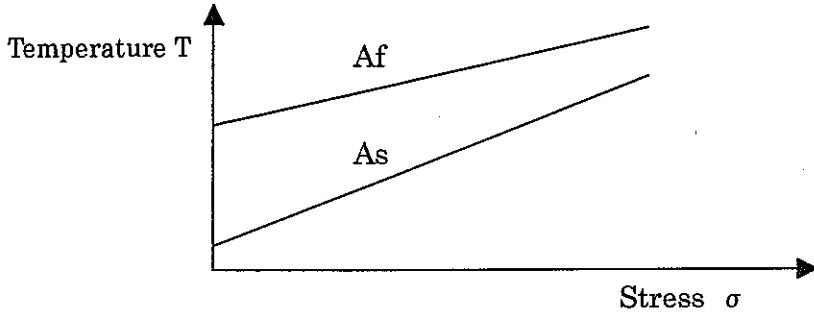


Fig. 5-6 Concept of Stress Effect on A_s and A_f
オーステナイト変態開始点 A_s および終了点 A_f と応力の関係

Fig. 5-7 は、回復ひずみ量への応力の影響について概念的に示したものである。図では簡単のため、応力-ひずみ関係曲線を固定して、加工ひずみ ϵ_m に相当する応力 σ_w が生じている状態では回復ひずみ ϵ_m は 0 で、応力が 0 の場合は回復ひずみは ϵ_{m0} として、その間の応力レベルについての回復ひずみを補間している。回復ひずみの応力依存性については試験データに基づいて適切に評価されるべきであるが、簡便な関係として考えられる例を Fig. 5-8 に示す。図中に示したものは、最も単純な関係として線形関係、1 係数のデータフィッティングができる 2 次関数関係、そして応力-ひずみ関係曲線を利用して係数倍 ($\times \epsilon_{m0} / \epsilon_w$) した関係である。回復ひずみ量への応力の影響を関数として表現できれば、式(5.8)および(5.9)に取り込んで全体の挙動をモデル化できる。

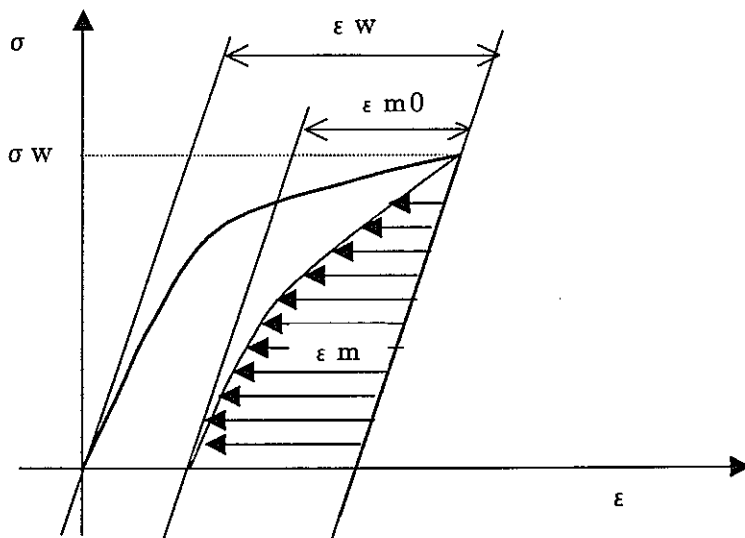


Fig. 5-7 Effect of Stress on Recovery Strain
回復ひずみ量への応力の影響

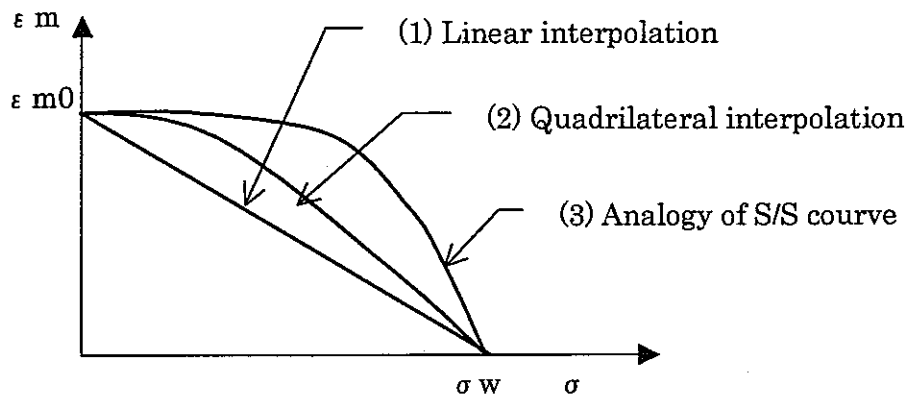


Fig. 5-8 Relation between Stress and Recovery Strain
応力と回復ひずみの関係

5. 3. 3 構成式

全体のひずみを次式で表す。

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^\theta \quad (5.10)$$

ここで、 ε^e はひずみの弾性成分、 ε^p は塑性に見立てた超弾性ひずみの非線形部分、 ε^θ は温度を変化させる時点で生じるひずみ成分であり、

$$\varepsilon^\theta = \alpha \Delta T - \varepsilon_M(T, \varepsilon_w(\text{training}), \sigma) \quad (5.11)$$

上式の右辺第1項は通常熱膨張ひずみで、 α は線膨張係数、 ΔT は温度差である。第2項は式(5.7)～(5.9)に示した形状回復ひずみであり、トレーニングを含む加工ひずみレベル、温度および応力の関数である。

以上、形状記憶合金の機械的特性のモデル化の考え方について述べた。本方法では、回復ひずみに及ぼす因子を想定し、個々の因子について記述式を作り、全体モデル式の中に組み込むという方法をとった。実現象では各因子が相乗的により複雑に作用して回復ひずみに影響を及ぼす可能性もあり得るが、この点については個別因子についての実験的検証ののち、総合的な実験的検証によってモデル式の修正の要否を検討すべきである。

5. 3. 4 実験より得られたモデル式

ここでは、5. 3. 2 (1) に述べた加工ひずみと回復ひずみの関係のモデル式について示す。またモデル式の条件として、原点を通り、原点において勾配1を付したが、ここでは実験データとのフィッティングを良好にする観点から、原点において勾配1という条件は除いた。

前述3章における実験で得られた単軸引張りにおけるトレーニング有りと無しの場合の加工ひずみ ε_w と形状回復ひずみ ε_m の関係を回帰分析により3次式で定式化し、トレーニング無しの形状回復ひずみ ε_{m0} では (5.12) 式、トレーニング有りの形状回復ひずみ ε_{m01} では (5.13) 式が得られ、Fig. 5-9, Fig. 5-10 にそれぞれ実験値と併せて示した。

$$\varepsilon_{m0} = 21.850 \varepsilon_w^3 - 7.328 \varepsilon_w^2 + 0.706 \varepsilon_w \quad (5.12)$$

$$\varepsilon_{m01} = 39.953 \varepsilon_w^3 - 12.869 \varepsilon_w^2 + 1.206 \varepsilon_w \quad (5.13)$$

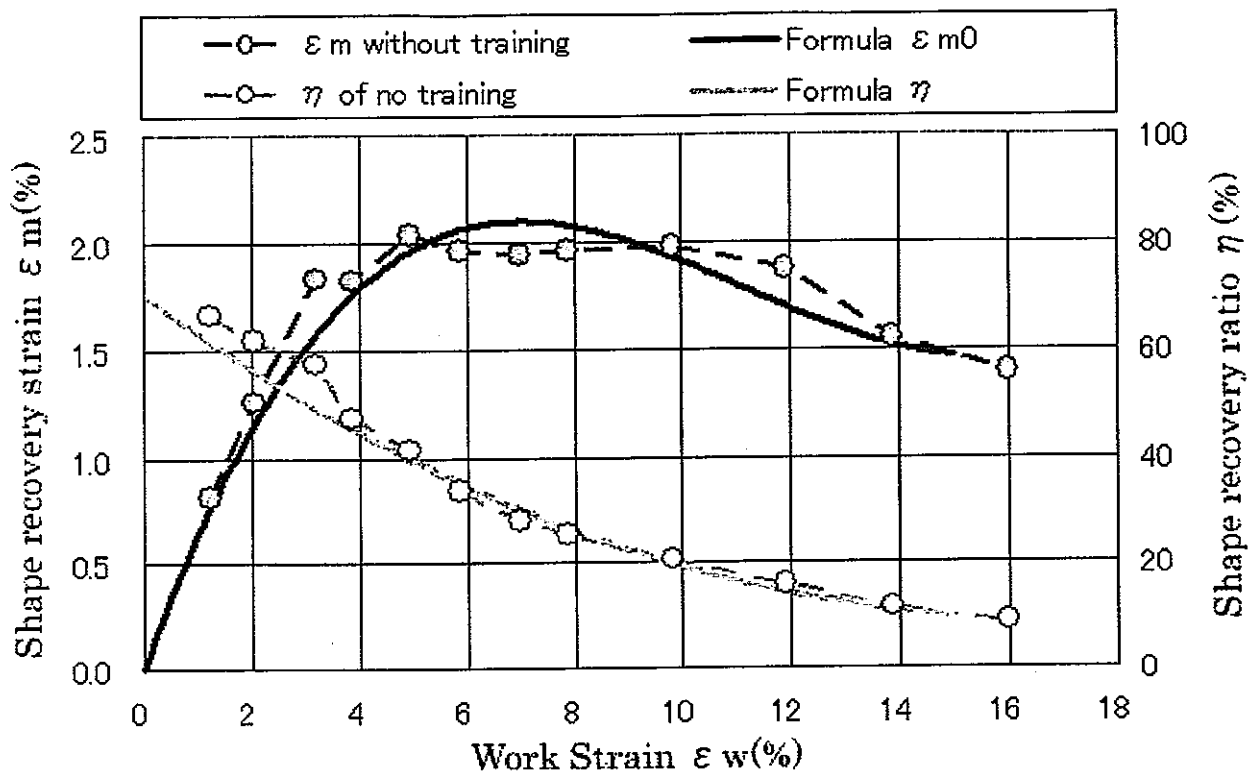


Fig. 5-9 Recovery characteristics of FSMA without training treatment obtained by experiment and calculation by model formula
 実験とモデル式から得られたトレーニング無し材の形状回復ひずみ

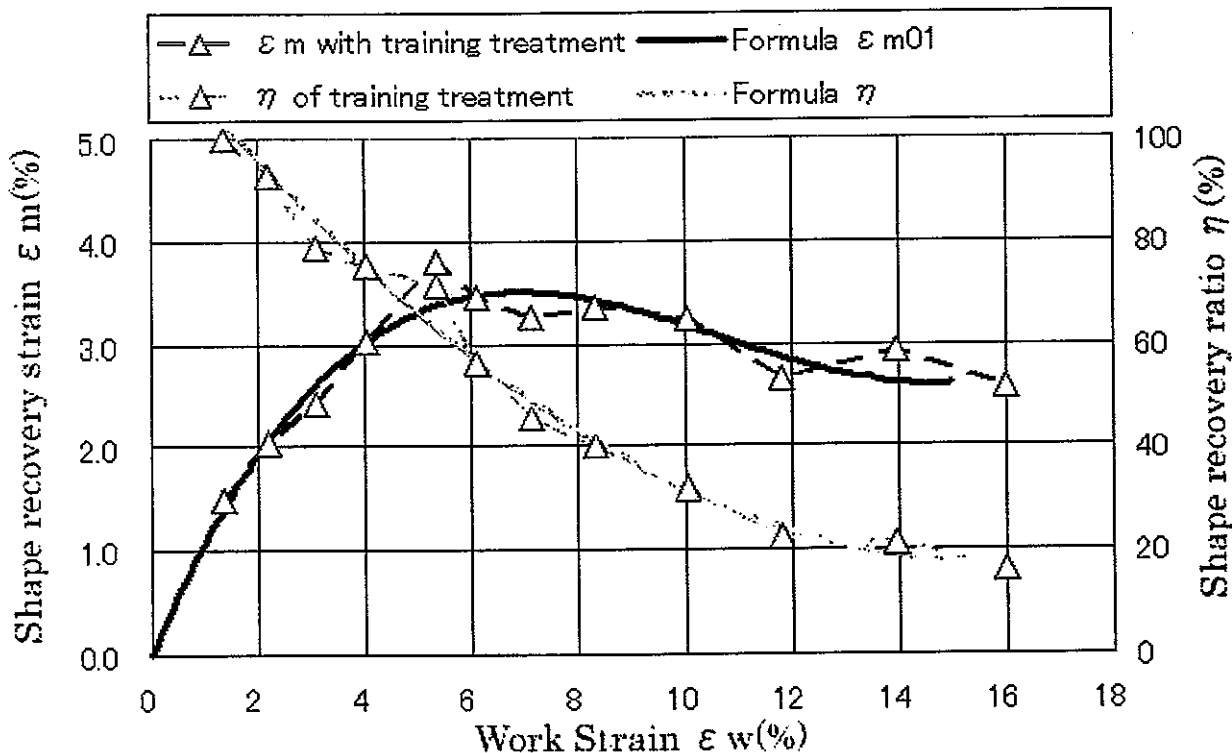


Fig. 5-10 Recovery characteristics of FSMA with training treatment obtained by experiment and calculation by model formula
 実験とモデル式から得られたトレーニングあり材の形状回復ひずみ

6 機械的特性モデルの検証

本研究で提案した機械特性のモデル化の例として、ここでは矩形中実試験体の4点曲げ試験、および六角中空試験体の3点曲げ試験をモデル化のうえ、この妥当性を検証した。

6.1 矩形断面梁の4点曲げ試験

6.1.1 試験方法

4点曲げ試験により加工ひずみを与えて応力誘起マルテンサイト変態を生じさせ、その後熱処理によりオーステナイト相への逆変態を発生させて形状記憶特性を調査した。

高さ10mm×幅20mmの矩形断面を有する梁を試験片として、Photo 6-1に示すような引張り・圧縮試験機を用いて4点曲げを行い、梁断面内にひずみ分布を与えて応力誘起による ϵ -マルテンサイト変態を生じさせた。4点曲げの装置は2つのポンチの荷重点及び2つの支点とも梁の軸方向力を極力減少するため、ころを用いると共に液体油により潤滑を施した。

試験では、梁の断面に与える加工ひずみは曲げ内周部（上面）と曲げ外周部（下面）でそれぞれ最大の圧縮ひずみと引張ひずみとして、それぞれ4, 6, 8, 12, 16%の加工ひずみを与えた。加工ひずみを与えた曲がり梁を引き続き、400℃×10分のアルゴン雰囲気中で加熱を行いオーステナイト相への逆変態により曲げ戻しを行った。これより、曲げ加工後の加工ひずみ ϵ_w と曲率半径 ρ 、および逆変態した後の形状回復ひずみ ϵ_m と曲率半径 ρ について調査した。

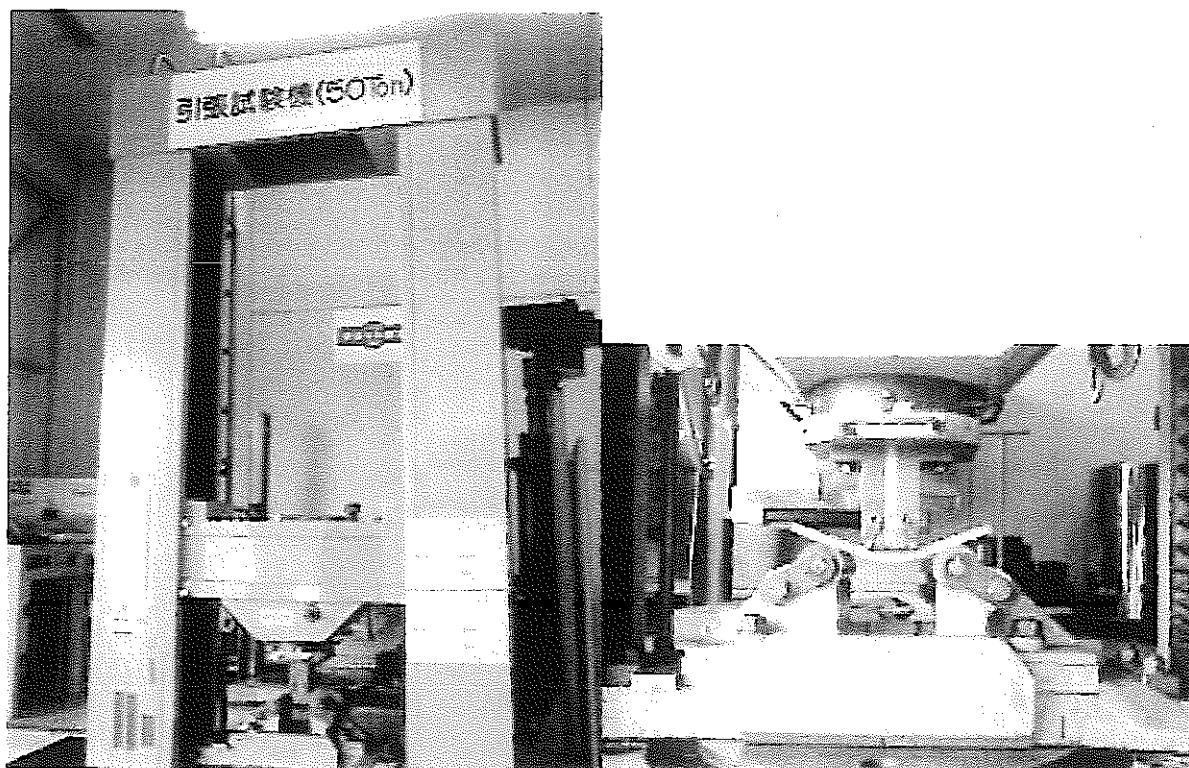


Photo 6-1 Experimental instrument for 4-point bending

なお、ひずみの測定はPhoto 6-2に示す罫書き針により試験体の内外面に刻線し、試験前後の刻線をスコッチテープに転写した後、変位量の変化をコンパレータによって見ることとした。その際、試験体にスコッチテープを貼る前に有機溶剤で洗浄後、黒鉛塗料を吹き付け、乾燥後に貼ることによってテープの剥離を容易にすると共にテープの伸び、縮みの経時変化をほぼ無くすることができることを確認している。よってテープの伸縮による変位量の誤差は無いものと仮定する。実際にコンパレータによって測定したスコッチテープはPhoto 6-3に示すように曲げ加工前に梁の上下面に奥行き方向と長手方向の中心から5mm間隔で罫書き線を描き、Photo 6-4に示すように曲げ加工後スプリングバックした状態で梁の曲げ内周部（上面）と曲げ外周部（下面）に罫書き線の転写されたスコッチテープの間隔の変化をマイクロメータにより累積測定し加工ひずみを計算した。また曲げ

変形した梁の曲率半径を円弧の弦を測定する方法により計算から求めた。

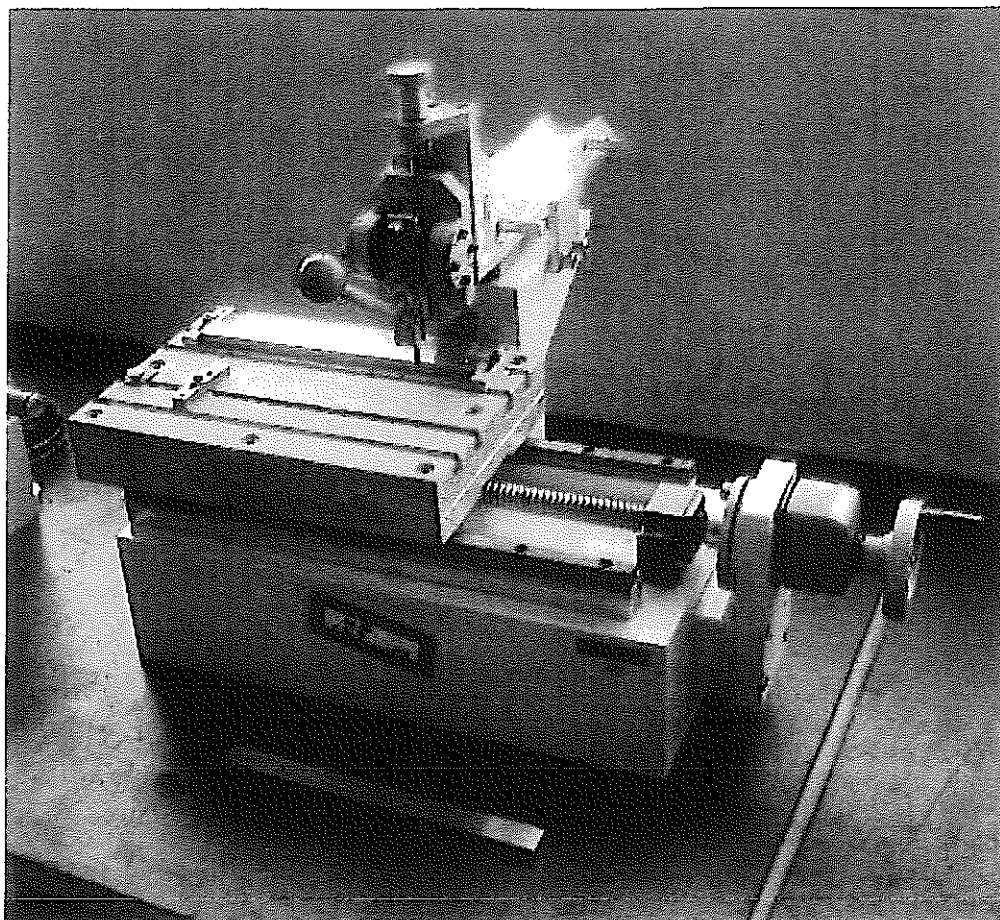
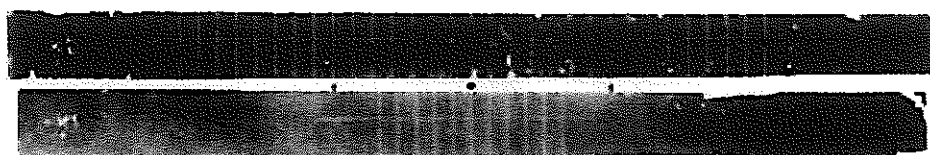


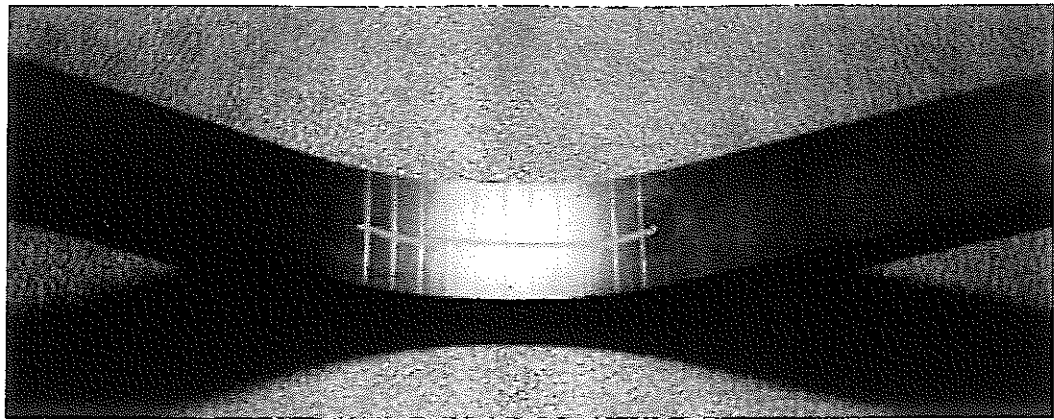
Photo 6-2 Scriber



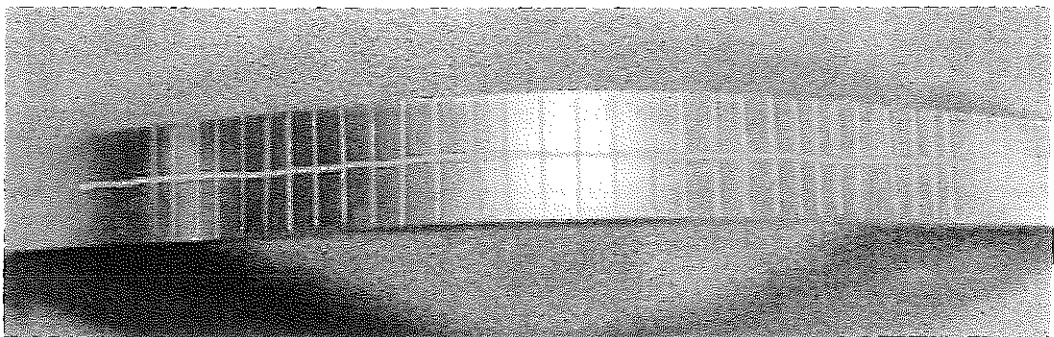
Bottom

Top

Photo 6-3 Scotch tape removed from specimen



Top



Bottom

Photo 6-4 Deformed specimen of four-point bending

6. 1. 2 FEM 解析方法

4点曲げ変形挙動を汎用解析ソフトによる有限要素法による数値解析を行い実験と比較した。有限要素法モデルは Fig. 6-1 に示すように長手方向 1/2 対称，奥行き方向 1/2 対称の 1/4 モデルで 8 節点要素の 3 次元構造体とした。また支持台，負荷子は剛体と設定し，図中赤色部のひずみについて実験と比較，検討した。

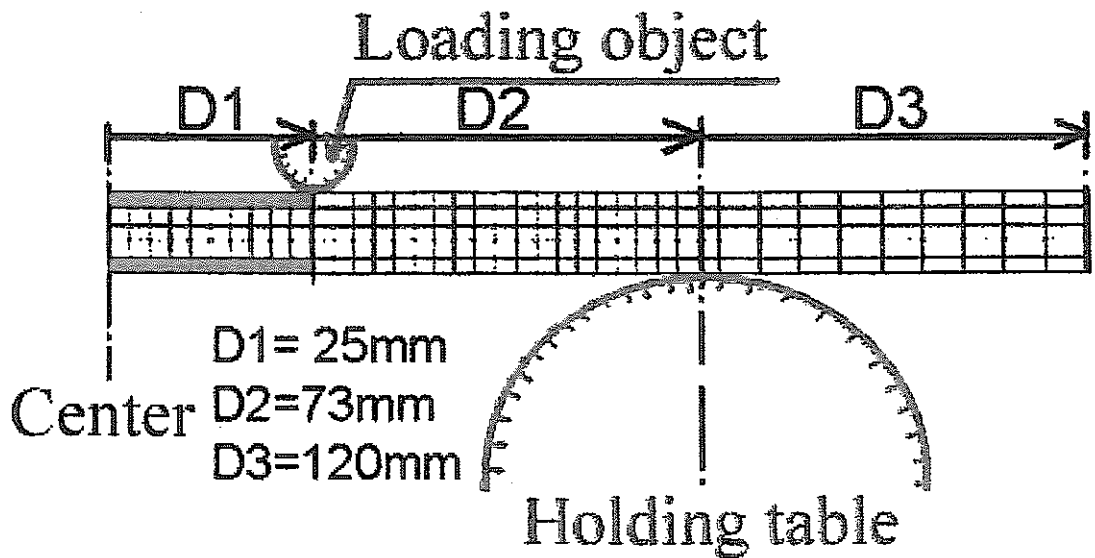


Fig. 6-1 FEM model of four-point bending

曲げ加工により生じる梁の軸方向加工ひずみ ε_w に対応した形状回復ひずみ ε_m を、今回測定された単軸引張り加工ひずみ ε_w と形状回復ひずみ ε_m の関係から求め、有限要素モデルの各要素に対応した形状回復ひずみ ε_m を各要素で異なる熱ひずみ ε_t として長手方向に(6.1)式で膨張係数 α と温度上昇 ΔT の関数として与え、材料の異方性から板厚方向、幅方向には(6.1)式で得られた ε_t の-1/2の値をそれぞれ熱ひずみに応じて算出し、各要素の異なる材料特性として入力した。すなわち、加熱によるオーステナイト相への逆変態による変形の与え方は仮想した熱膨張変形に換算して解析した。

$$\varepsilon_t = \alpha \cdot \Delta T \quad (6.1)$$

有限要素解析に用いる鉄系形状記憶合金の降伏点、引張り強さ、ヤング率、ポアソン比は測定値を用い、ヤング率 E は 170.0GPa、横弾性係数 G は 65.0GPa、ポアソン比 ν は 0.359 と設定した。

6. 1. 3 試験結果

バージン材の梁に4点曲げ加工を行い応力誘起による ε マルテンサイト相を生成した後、熱処理を施してオーステナイト変態をさせ、ひずみ分布や曲率の変化を測定した。また変形挙動を有限要素法による数値解析を行い実験と比較した。

Fig. 6-2 はポンチ (荷重点) を 10mm から 60mm まで降下した時の変位と 2つのポンチ間の曲げ外周部 (下面) において、実験によって得られた最大引張りひずみ ε_{wmax} 及び 2点ポンチ間の弦の長さ c と弦の高さ h より幾何学的に求まる (6.2) 式によって求めた曲率半径 ρ を示している。ポンチ変位が増加していくと、梁の曲率半径が小さくなるとともに、曲げ内周の上面に生じる圧縮変形による圧縮ひずみは増大し、曲げ外周部 (下面) に生じる引張り変形による引張りひずみも増大する。

$$\rho = (4h^2 + c^2) / (8h) + nt \quad (6.2)$$

ここで h は弦の高さ、 c は弦の長さ、 n は中心軸の板厚比 (今回は 0.5 とした)、 t は板厚である。加工ひずみが 4% における梁の曲げ外周面に生じる引張りひずみ ε_w を Fig. 6-3 に実験値と解析値を比較して示した。解析値と実験値を比較した結果、両者とも 4点曲げの特徴である 2つの荷重点間のひずみはほぼ一定であり、荷重点から支点までは漸減する。

4点曲げ試験の変形挙動は 3次元モデルによりを解析した。その際、梁の形状回復挙動では、解析モデルから求められた各要素の加工ひずみ ε_w に対応して、(5.12)式におけるトレーニング処理無し単軸引張り試験で得られた形状回復ひずみ ε_{m0} を導き出し、これを熱ひずみとして各要素に与えた。

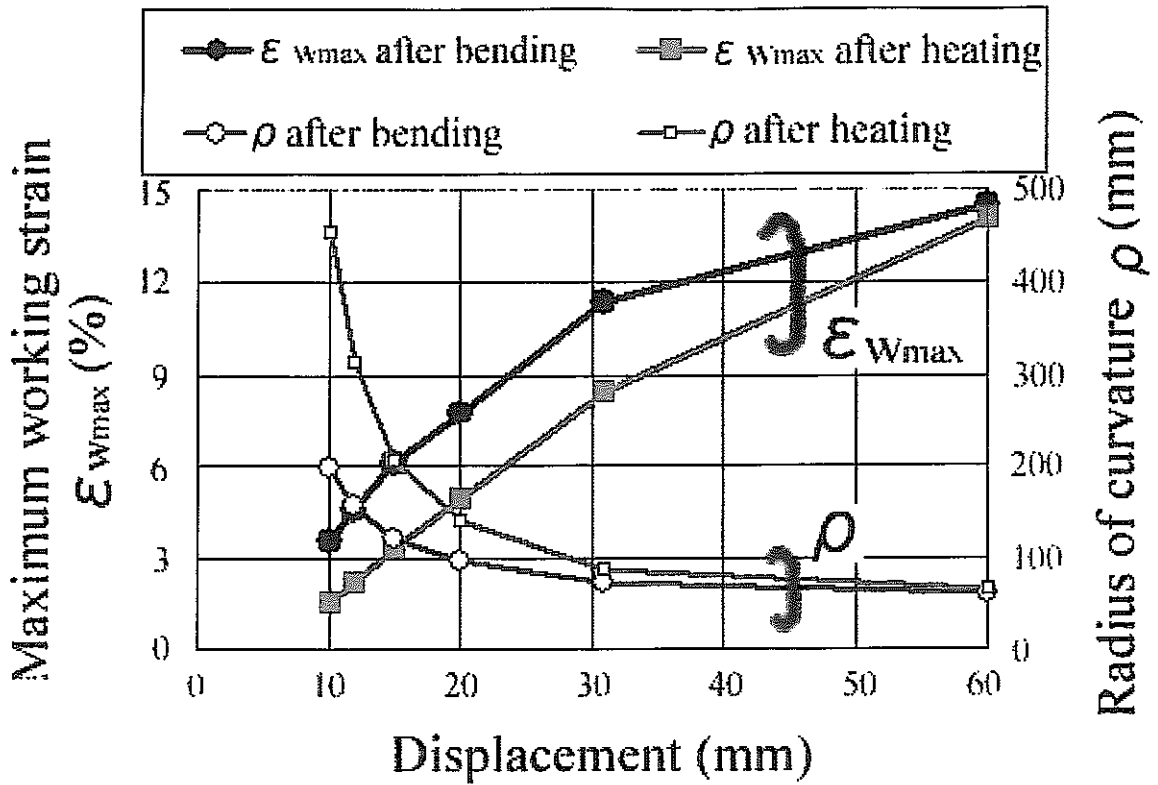


Fig. 6-2 Distributions of work strain and radius of curvature at 4-point bending

次に曲がり梁の曲げ戻しを 400℃×10 分の変態熱処理によって行い、曲げ戻しによる梁の曲げ外周面における形状回復ひずみ ϵ_{bm} を曲げ加工後のひずみ ϵ_w と比較して実験値、解析値を Fig.6-3 に併せて示した。尚、形状回復ひずみ ϵ_{bm} とは熱処理による曲げ戻しによる形状回復したひずみと定義している。形状回復ひずみ ϵ_{bm} は加工ひずみ ϵ_w に比べて大幅に減少しており、熱処理による形状回復が観察された。実験値と解析値を比較した結果、全く同様の挙動を示しており、また中心部においては、ほぼ同一直線上になり単軸引張り試験の結果から曲げ変形挙動の模擬が出来ることを明らかにした。

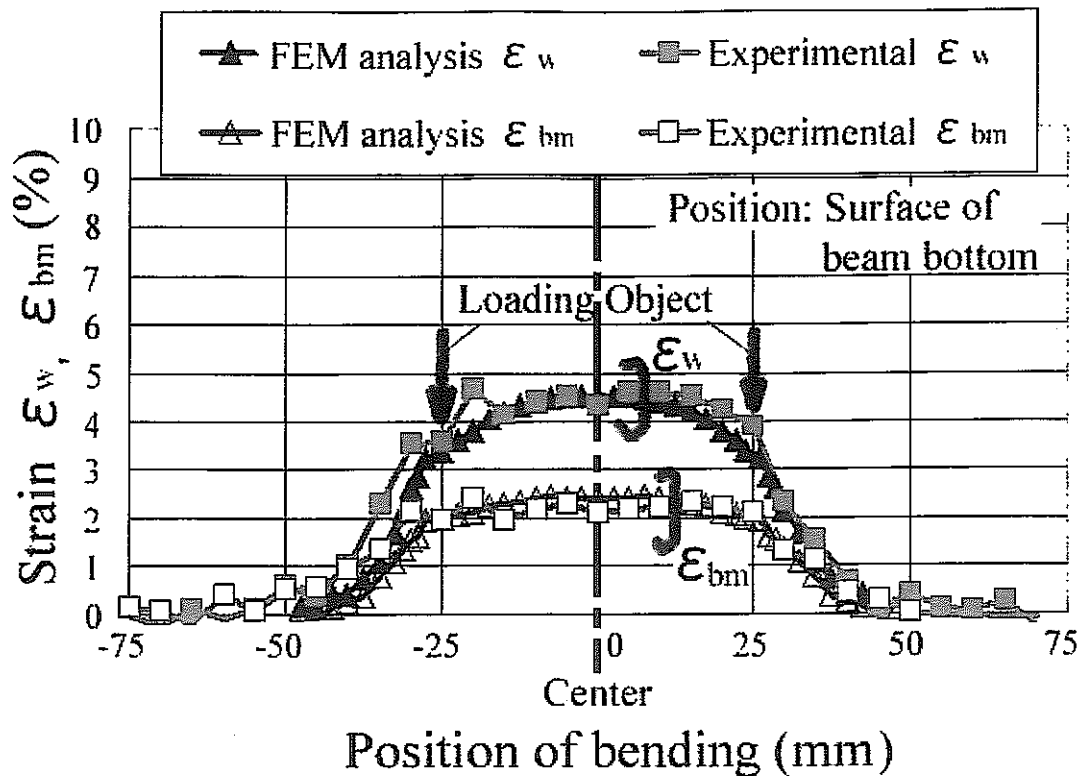


Fig. 6-3 Strain distributions of four-points bending at 4% work strain

同様に 6%, 8%, 12%における曲げ及び曲げ戻しによる梁の曲げ外周面における形状回復ひずみ ϵ_{bm} と曲げ加工後のひずみ ϵ_w の実験値, 解析値を Fig. 6-4~Fig. 6-6 に示す。加工ひずみ 4% のものと同様に加工ひずみ ϵ_w の実験値と解析値を比較すると, 2つの荷重点間のひずみはほぼ一定であり, 荷重点から支点までは漸減しているが, Fig. 6-4, Fig. 6-5 においては曲げ軸方向に, Fig. 6-6 においては負荷子上において若干の誤差を生じた。

Fig. 6-4~Fig. 6-6 における誤差については以下の3つの原因があると推察する。

- (1) 解析における機械的特性値をすべて一律に与えたが, 実際の材料では外表面と内部では材料特性が異なる可能性がある。
- (2) 解析では試験片と負荷子の接触判定を Element の Node によって行っており, Node の数をひずみ分布を再現できる程度としたが十分な要素数でなく, 実験における接触面のへこみを再現するに至らなかった。
- (3) 解析において外表面のひずみは外挿法によって行われるが, その精度は板厚の要素分割数に依存するので, 今回の解析モデルでは板厚方向の要素数不足より誤差が生じた。

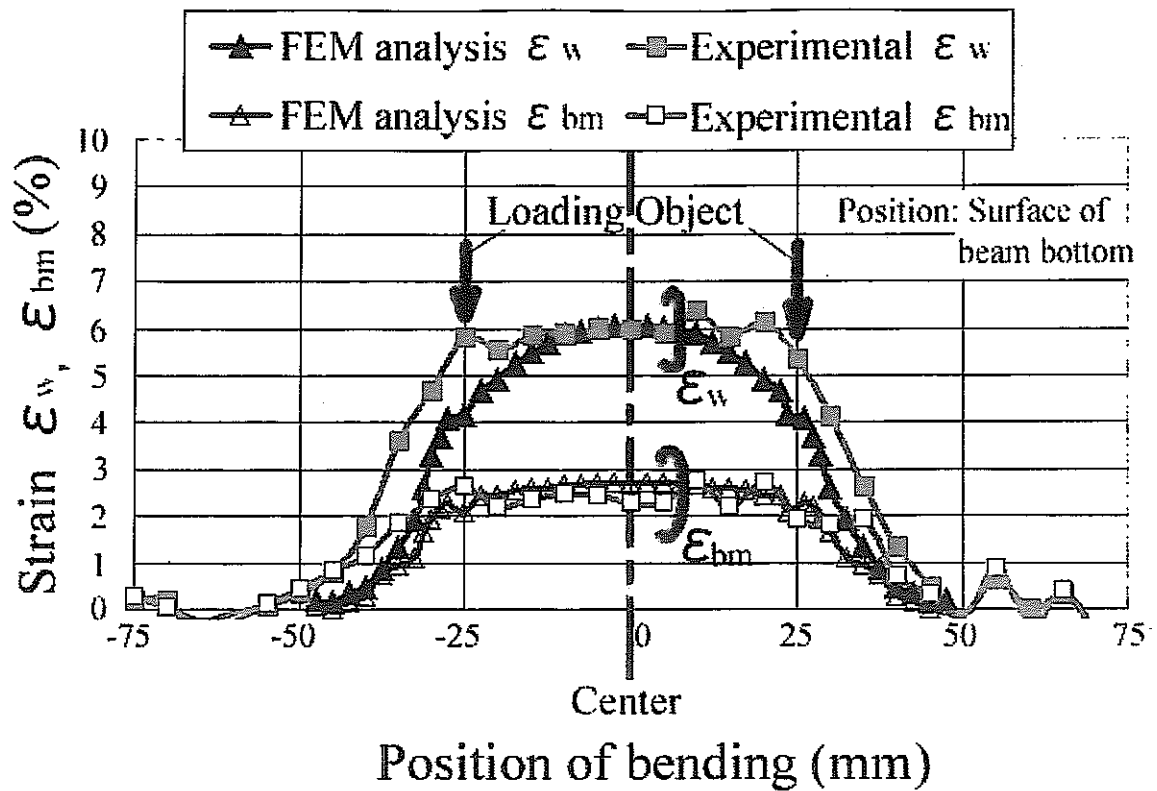


Fig. 6-4 Strain distributions of four-points bending at 6 % work strain

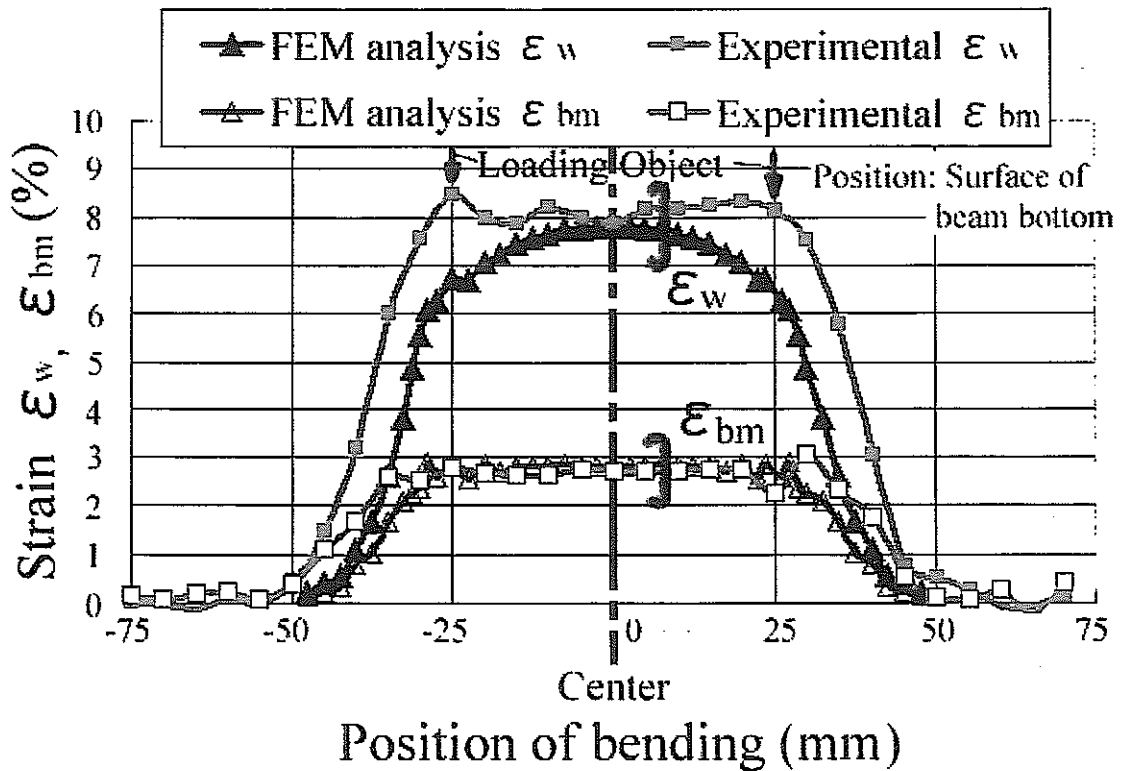


Fig. 6-5 Strain distributions of four-points bending at 8 % work strain

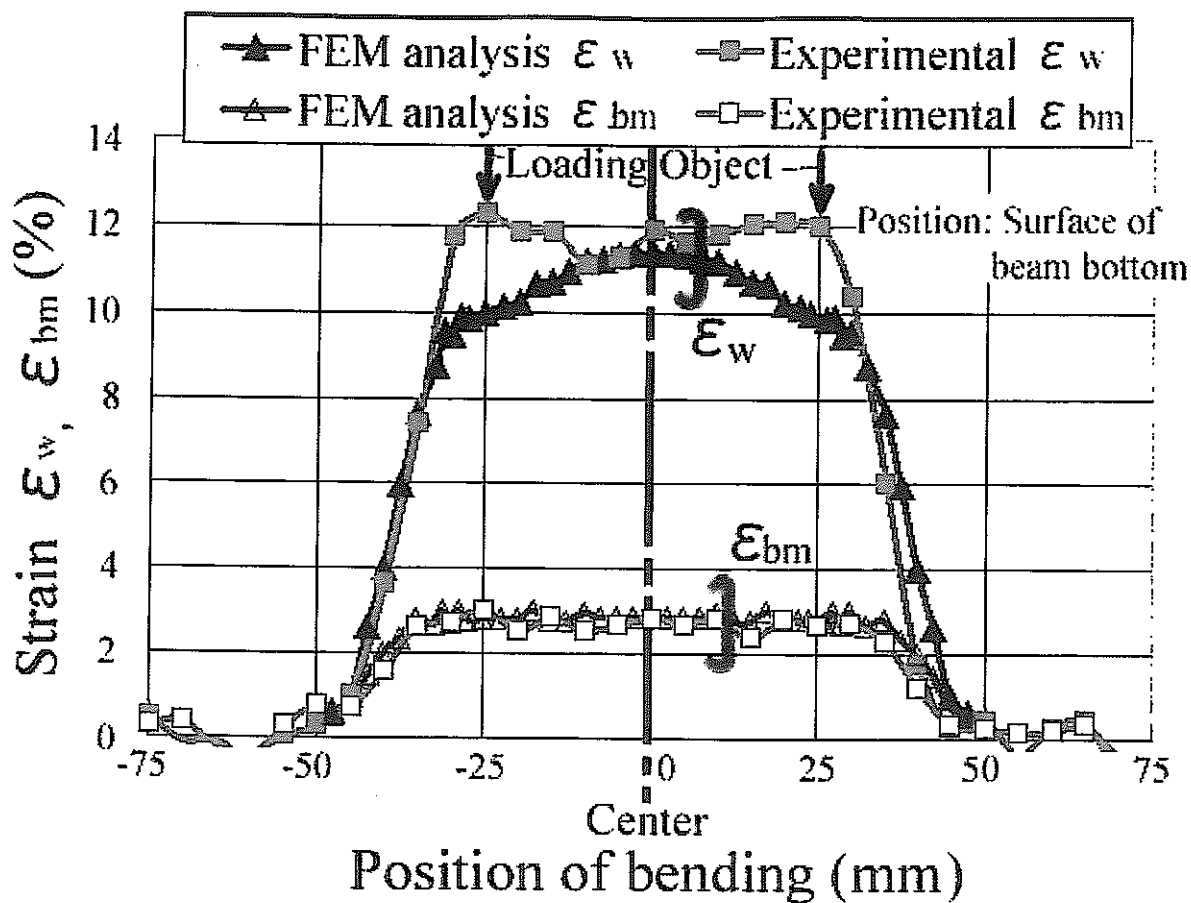


Fig. 6-6 Strain distributions of four-points bending at 12 % work strain

曲げ加工ひずみ ϵ_{bw} 4 % から 12% における形状回復による曲げ外周面のひずみ ϵ_{bm} と、単軸引張りにおける加工ひずみ ϵ_w の関係の関連性について明確にするため以下に考察した。

梁の中央部近傍で曲げ外周面(下面)における形状回復後のひずみ ϵ_{bm} 、形状回復ひずみ式 ϵ_{m0} と同じ部位の4点曲げ後の加工ひずみ ϵ_w 関係を Fig. 6-7 に示した。また参考として単軸引張りにおける形状回復ひずみを定式化した (5.12) 式より ϵ_{m0} を併せて示した。

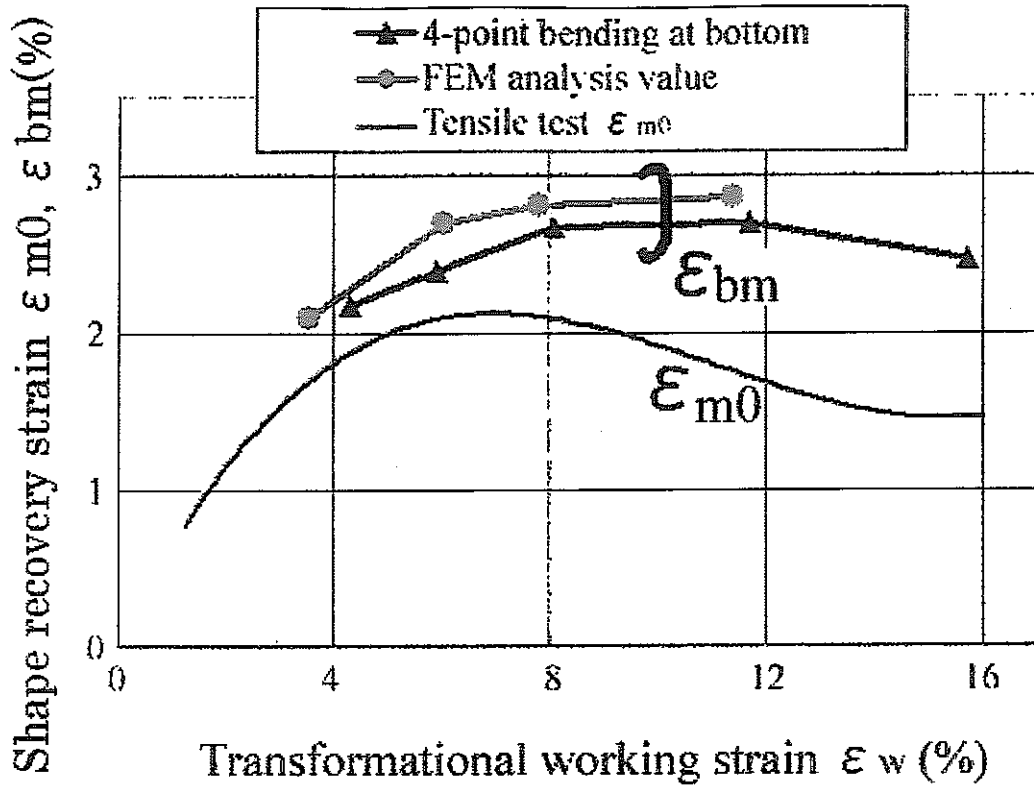


Fig. 6-7 Relationship between shape recovery strain ϵ_m , ϵ_{bm} and work strain ϵ_w

4点曲げにおける形状回復ひずみ ϵ_{bm} は実験と FEM 解析はほぼ一致しており、参考に示した単軸引張りの形状回復ひずみ ϵ_m を上回っている。

この理由を以下のように考察する。Fig. 6-8 に示すように 4 点曲げにより加工を受けた曲がり梁の断面内では、主として梁の軸方向に加工ひずみを生じるが、そのひずみの値は曲げ中立軸において零で、梁の厚さ方向に直線的な分布となる。直線的な加工ひずみに対して、熱処理による形状回復ひずみは非線形の(5.12)式で付与されることになるが、熱処理による曲げ戻し変形においては、軸方向に生じる形状回復ひずみは線形に近いと考えられる。従って Fig. 6-8 に模式的に示すように、形状回復による軸方向のひずみ ϵ_{bm} は中立軸から厚さに比例した直線となる。曲げ外周部においては単軸引張りの形状回復ひずみ ϵ_m との交点より中心側では 2 次的圧縮ひずみを生じ、外周側では 2 次的引張りひずみを生じていることにより梁断面内で応力の釣り合いをとっていると推定している。すなわち Fig. 6-8 の実験と有限要素解析結果を整理すると、梁断面内では軸力が零となるような 2 次的圧縮ひずみと 2 次的引張りひずみに変形していると推定している。

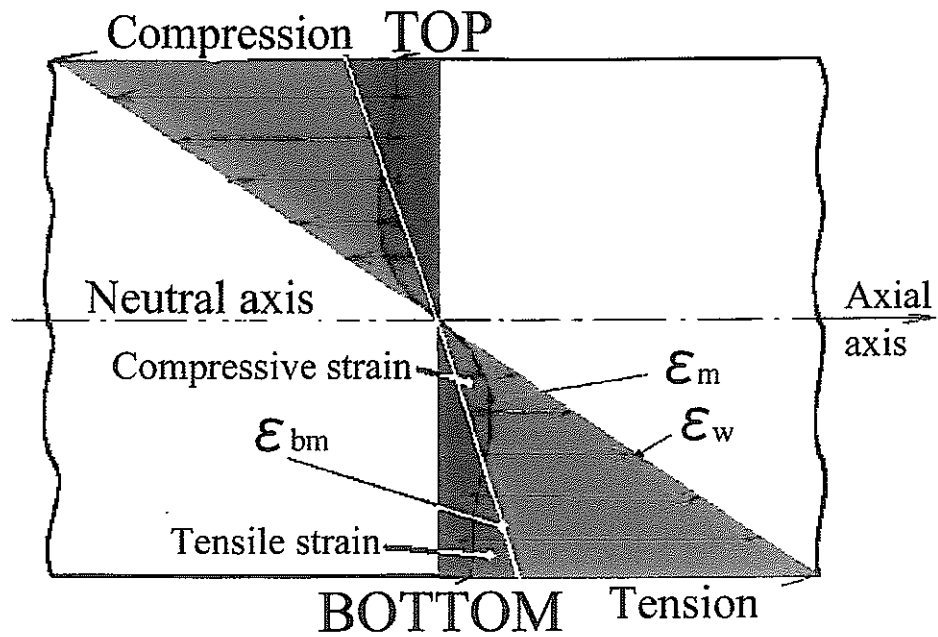


Fig. 6-8 Strain distributions at beam section after recovery heat treatment

6. 2 燃料集合体模擬試験体の3点曲げ試験

6. 2. 1 燃料集合体模擬試験体の製作

高速増殖炉「もんじゅ」ラッパ管の約5分の1縮尺に相当する燃料集合体模擬試験体を Fig. 6-9 に示す手順で製作した。試験体はラッパ管の両端にエントランスノズルとヘッドを取り付け、ラッパ管中央近傍にはパッドを取り付けた。ラッパ管とパッドは鉄系形状記憶合金、エントランスノズルとヘッドは SUS316 とした。またラッパ管は薄板をプレス成形後、TIG 溶接により組み立てた。溶接線は辺中央とした。寸法及び形状は Fig. 6-10 に示す。

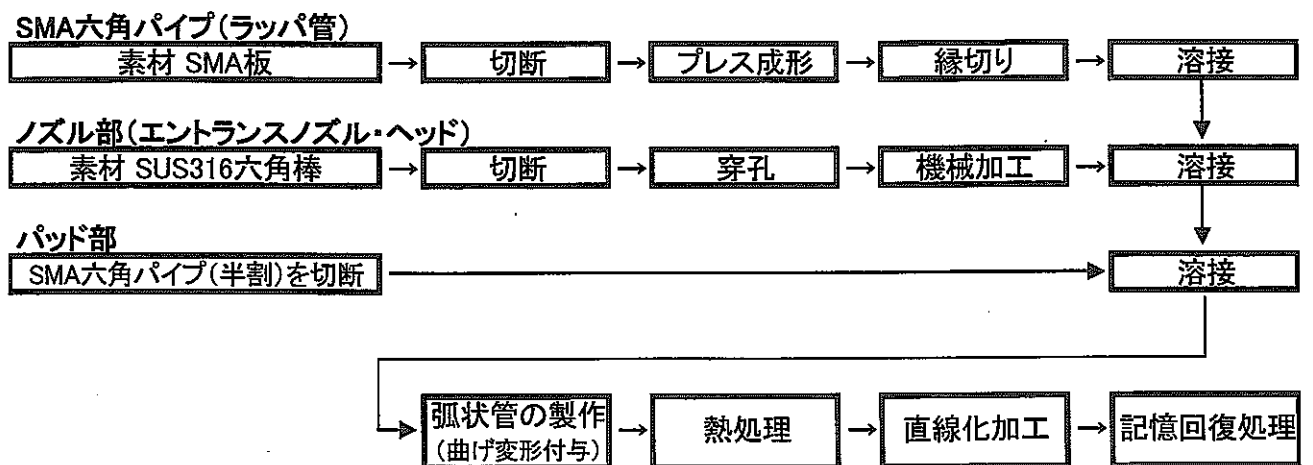


Fig. 6-9 Manufacturing and test procedure of deformation simulator of subassembly
燃料集合体模擬試験体の製作および試験手順

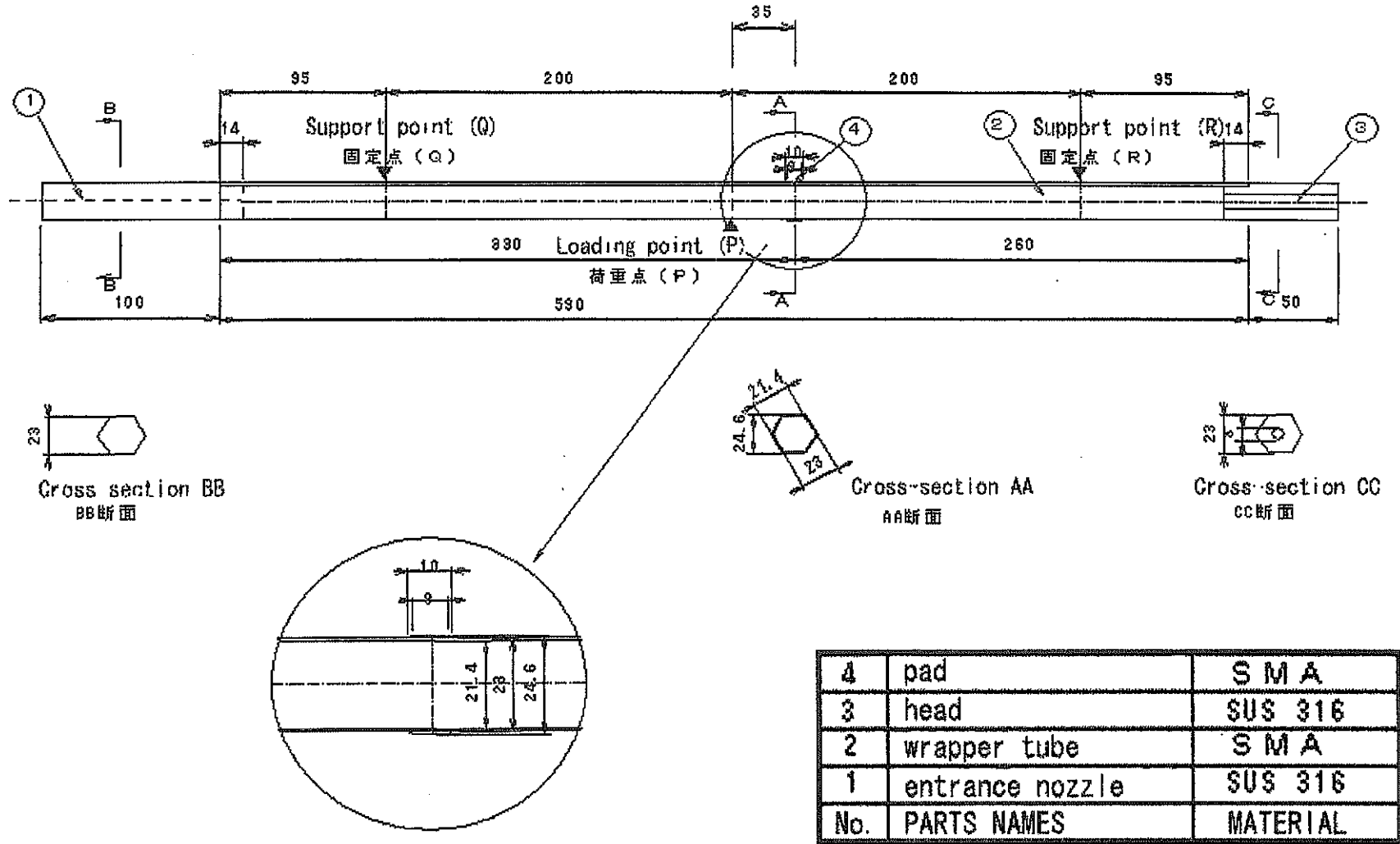


Fig. 6-10 Drawing of deformation simulator of subassembly
燃料集合体模擬試験体図面

(1) ラップ管の製作

試験に用いるラップ管は、以下の (i) ~ (v) の工程により製作した。成形後のラップ管は、辺間距離 23.0mm, 長さ約 590mm である。

(i) 切断

当初の試験ではプラズマ切断を用いたが、最終的にはシートメタルカッター (ドラコ社製 シートメタルカッター) によるシャー切断を用いて、所定の寸法 0.8×52×590L に切断した。切断は刃物に定規を当てて手動にて行った。

(ii) プレス成形

切断の後にプレス成形を行ったが、これには油圧プレス (三恵機械 (株) 製 MPRS-30/30 トン) を用いた。

作業手順としては、まず上下金型に潤滑油 (MoS₂ 入り) を塗布した。次に、後工程の加熱の際に素材の記憶回復効果でワークが変形するのを防ぐため、素材 (板) をバーナーで赤くなるまで加熱し、300℃前後での温間プレス加工を行った。この加熱には、素材に残留している応力を除去する意味も持たせている。さらに温間加工の温度を十分に確保するために、上記作業は 2 度繰り返して行った。

(iii) 縁切り

縁切りは、シートメタルカッター (ドラコ社製 シートメタルカッター) を用いたハンドシャー切断とした。切断は、治具を当てて手動にて行った。

(iv) 溶接

溶接は、TIG 自動パルス溶接とした。溶接箇所は辺の中央とし、角部での溶接を避けた。使用機器と溶接の条件を以下に示す。

使用機器・機種： (株) サンワ製 水平自動溶接機 型式：LX-500 定格出力：300A

溶接条件 ・極性：直流正極性

- ・溶接電流—ベース電流：35A—20A
- ・パルス：30Hz
- ・速度：800mm/min.
- ・シールドガス：アルゴン
- ・溶加材：使用せず

また仮止め及び手直しは手動溶接で行った。この場合は電流 22A, 径 1.0mm の溶加材を用いた。手順としては、まずワークを、治具を用いて万力で固定し、50mm 間隔で点付けをしたのち、同一材 (寸法 0.8 t×20×20mm) を両端に点付けし、タブ板とする。これを本溶接しているが、溶接熱による記憶回復効果により、やや形状の崩れる傾向が見られた。

溶接後のラップ管の辺間寸法を Table 6-1 に、溶接位置を Fig. 6-11 に示す。

Table 6-1 Dimensions of wrapper tube (mm)
ラップ管の寸法 (mm)

辺間寸法									長さ
ノズル側			中央			ヘッド側			
A	S	B	A	S	B	A	S	B	
23.64	23.52	23.33	23.58	23.71	23.59	23.66	23.03	23.39	591.3

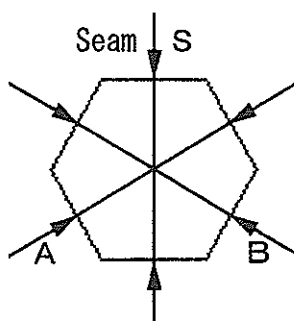


Fig. 6-11 Cross section and welding position of wrapper tube
ラップ管の断面形状と溶接位置

(2) ノズルの製作

ノズルは、市販の六角棒を 120mm に切断して製作した。実部材では孔があいているが、本試験では穿孔部の再現は行わない。なおフライス盤により、ラップ管挿入部（深さ 0.8mm×長さ 14mm）の段差加工を実施した。

製作したノズルは、TIG 溶接によりラップ管と接合した。接合はノズルの段差加工部にラップ管を差し込み、手動溶接にて行った。使用機器と溶接条件は以下の通りである。

使用機器：日立製作所製 溶接機 型式 ARC-PAIR 200ST

溶接条件：電流 22A，溶加材（形状記憶合金）φ 1.2mm

(3) パッド部の製作

パッド部は、成形した半製品（形状記憶合金）を約 10mm 長に切断して使用し、これを手溶接で本体に取り付け、フライス盤で形を整えた。

これら (1) ~ (3) で製作したラップ管、パッド、ノズルの写真を Photo 6-5 に示す。

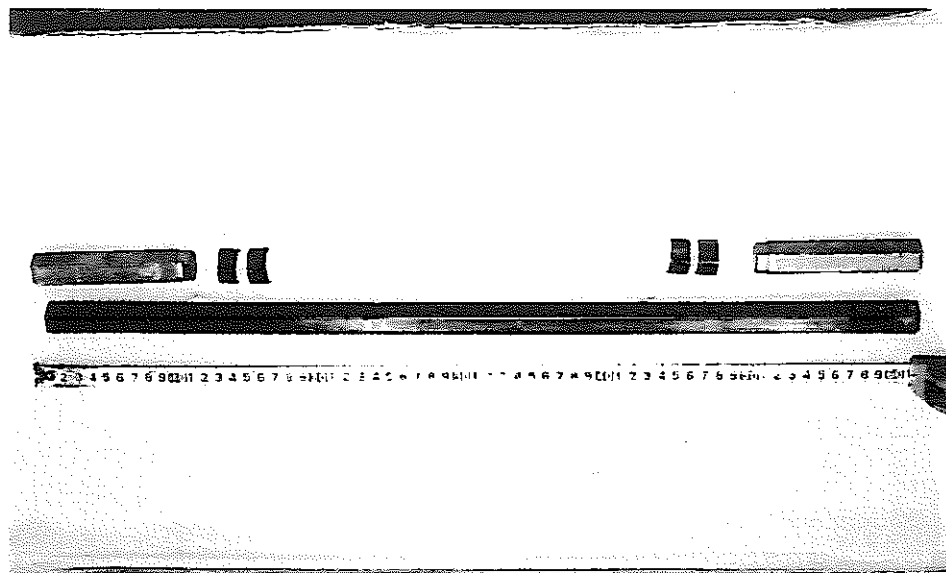


Photo 6-5 Wrapper tube(SMA), pad(SMA) and nozzle(SUS316)
ラップ管 (SMA), パッド (SMA) とノズル (SUS316)

6. 2. 2 試験方法

試験に用いた、六角中空試験体の3点曲げ試験装置の図面を Fig. 6-12 に示す。

(1) 弧状管の製作

燃料集合体模擬試験体を、3点曲げ試験装置を用いて加熱しながら曲げ加工を施し、弧状管とする。まず模擬試験体にひずみゲージを荷重点（測定箇所 5-6）と荷重点から 23mm 離れた位置（測定箇所 5）に貼付した。

次に荷重付加点の変位量が 10mm となるまで3点曲げを行った。この間、荷重点のひずみゲージ出力 0.1%刻みに、荷重点より±50mm の箇所で試験体の変形量を測定した。測定の結果を Table 6-2, Fig. 6-13 に示す。この表中の Step1～Step7 は荷重を付与して3点曲げ加工を行っている状態、Step8 は除荷した状態である。

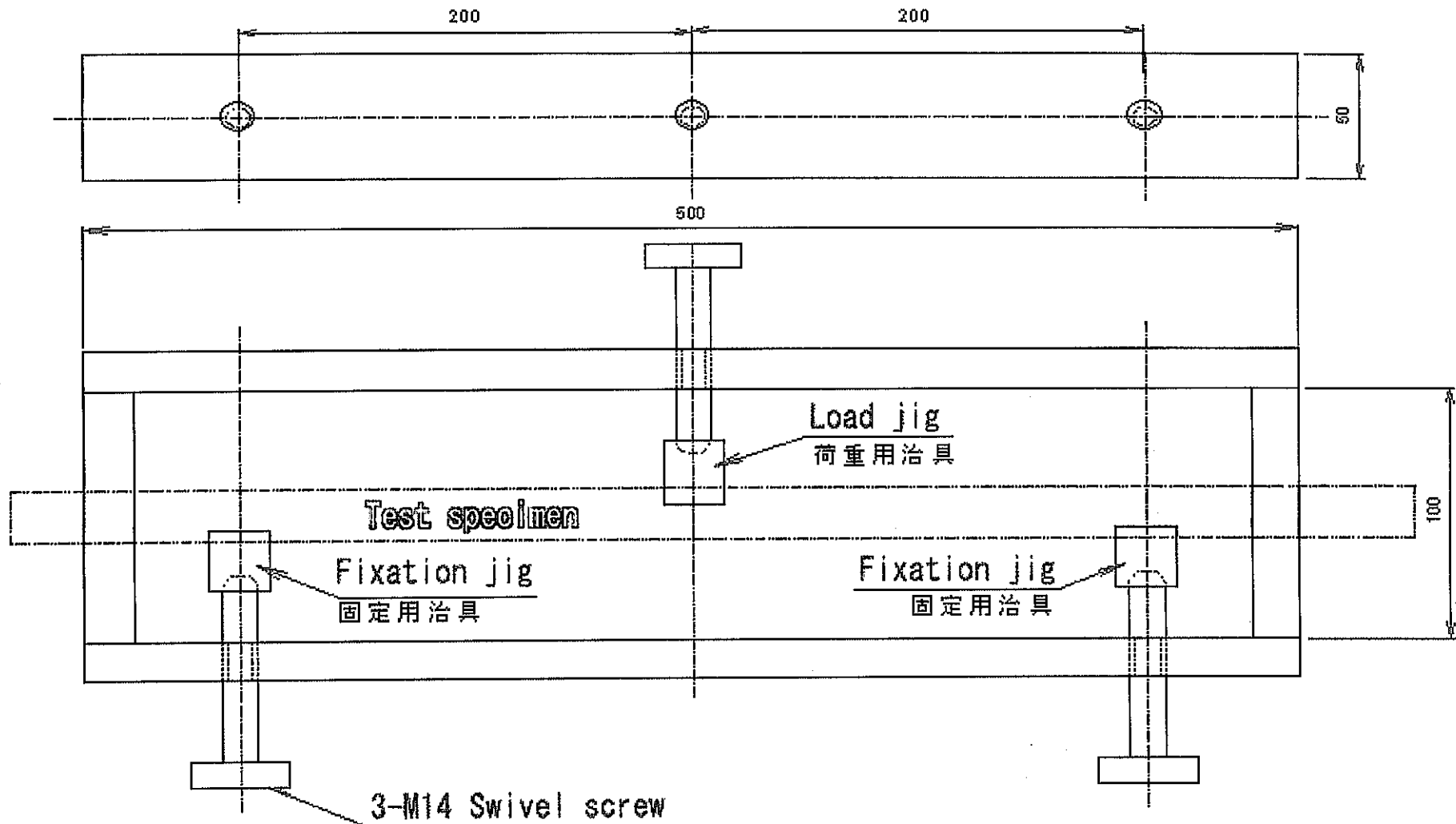


Fig. 6-12 Experimental instrument for 3-point bending of deformation simulator of subassembly
燃料集合体模擬試験体の3点曲げ試験装置

Table 6-2 Deflection of specimens at each step of 3-point bending
3点曲げ試験体の変位

測定箇所 (Step)	ひずみ (%)		変位量 (mm)								
	5-6	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.100	0.118	0.40	0.26	0.55	0.84	1.33	1.70	0.88	0.53	0.30
2	0.200	0.249	0.50	0.98	1.73	2.55	3.04	3.30	1.83	0.80	0.40
3	0.300	0.398	0.80	1.49	2.99	4.10	4.73	5.60	4.09	1.44	1.00
4	0.400	0.579	1.00	2.45	4.28	5.81	7.01	7.00	4.23	2.24	1.60
5	0.500	0.800	1.30	2.69	5.83	7.73	9.09	7.70	5.59	2.88	1.20
6	0.550	0.900	1.30	3.22	6.08	8.65	9.81	8.60	6.12	3.21	1.30
7	0.560	0.931	1.40	3.34	6.37	9.00	9.96	9.10	6.28	3.20	1.40
8	0.190	0.466	0.50	1.28	2.64	4.10	4.65	4.50	2.69	1.47	0.60

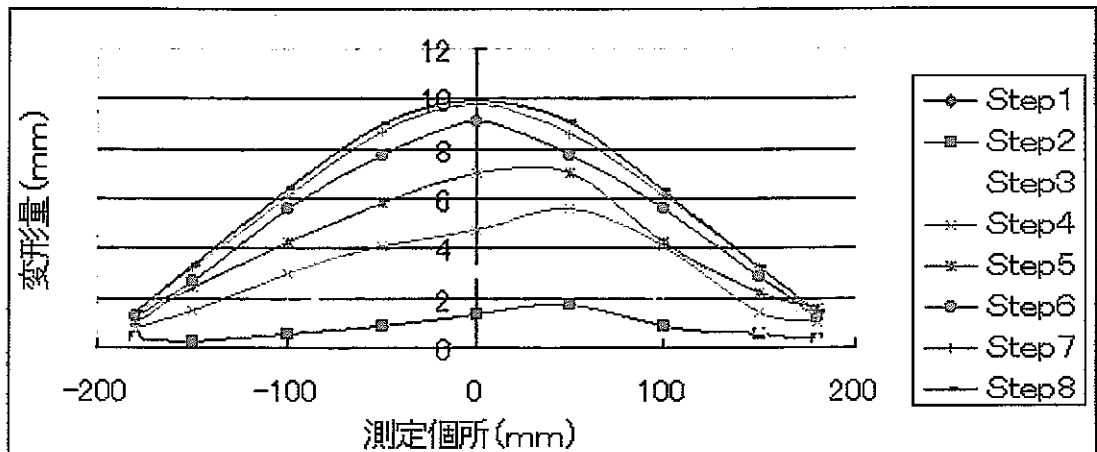


Fig. 6-13 Deflection of specimens at each step of 3-point bending
ステップごとの3点曲げ試験体の変位

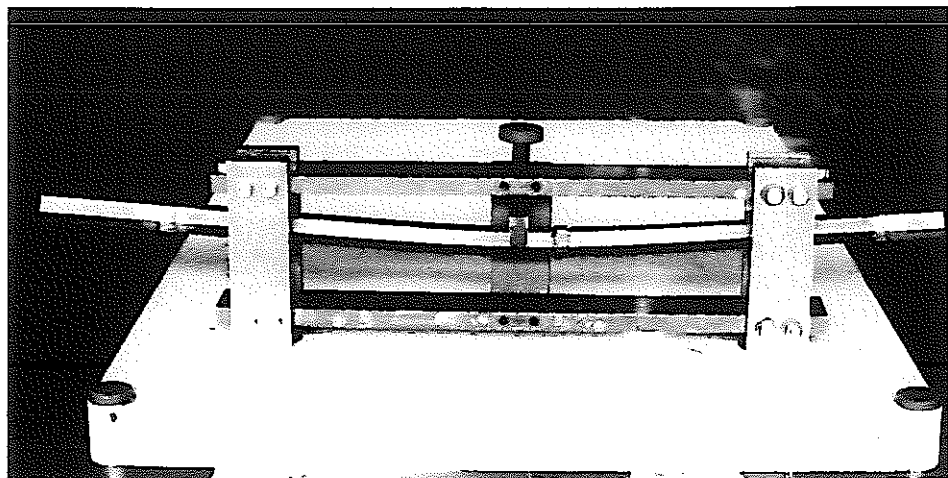


Photo 6-6 Wrapper tube after 3-point bending
3点曲げ付与終了後のラッパ管

(2) 直線化加工による加工ひずみの付与

形状記憶処理として、試験体を治具に固定したままプロパン炉にて加熱処理を行い、残留応力を除去した。加熱処理は 950℃の5分間保持、のち空冷とした。

この後、治具から取り外した際にスプリングバックの如く変形が戻る挙動が見られたために、再度熱処理を行った。このときの加熱温度は 950℃で保持時間は 30分、冷却は空冷とした。

以上の処理を行ったのち、曲げ変形を与えた状態を原形とし、荷重点、及び荷重点から±50, ±100, ±180mmの位置で変形量を測定した。変形量の測定結果は、次項(3) Table 6-3に併せて示す。また形状記憶処理後の試験体の状態を Photo 6-7に示す。

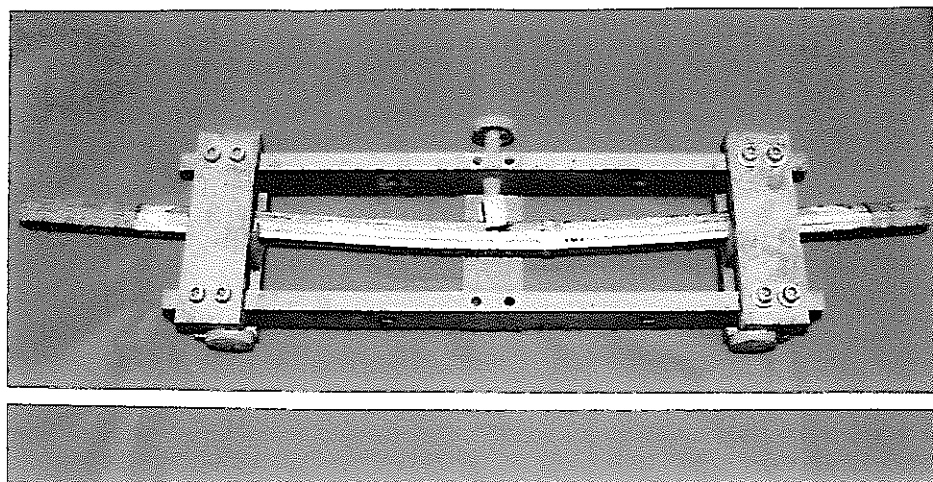


Photo 6-7 View of specimen after shape recovery treatment
形状記憶処理後の試験体の状態

形状記憶処理の後、治具を用いてワークを反転させ、取り付け負荷をかけて曲げ戻した。スプリングバックを調整しながら作業を行った結果、3度の処理にてほぼ直線状になった。

直線化加工の過程で測定した変位量とひずみを、Table6-4, Fig.6-14 に示す。また直線化加工の状況を Photo 6-8 に示す。Step0～Step8 は直線化加工を行っている工程、Step9 は除荷の状態である。

Table 6-3 Deflection of specimen at each step of linearization processing
直線化加工工程ごとの試験体の変位

測定箇所 距離(mm)	ひずみ (%)		変位量 (mm)								
	4-5	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Step 0	-	-	9.21	6.73	3.47	1.09	0.00	0.88	3.08	6.72	8.43
1	0.100	0.136	7.08	5.28	2.66	0.38	0.00	-0.01	2.55	5.40	7.25
2	0.202	0.271	6.14	4.64	2.17	0.03	0.00	0.52	2.05	4.69	6.00
3	0.303	0.420	5.24	3.84	1.66	0.03	0.00	0.60	1.82	3.76	4.66
4	0.400	0.566	4.26	3.27	1.44	-0.08	0.00	0.48	1.40	3.08	4.23
5	0.500	0.763	3.29	2.09	0.79	-0.24	0.00	0.26	-0.12	2.26	3.12
6	0.602	0.933	2.45	1.84	0.80	-0.34	0.00	0.14	0.62	1.79	2.40
7	0.781	1.184	1.34	0.86	-0.10	-0.49	0.00	-0.13	0.11	0.92	1.26
8	0.800	1.384	0.53	0.13	-0.48	-0.50	0.00	-0.21	-0.22	0.19	0.70
9	0.520	1.030	3.31	2.27	0.86	-0.42	0.00	0.20	0.85	2.31	3.18
最終形状	SBを修正後		-0.67	-0.81	-0.57	-0.48	0.00	-1.10	-1.23	-1.19	-0.93

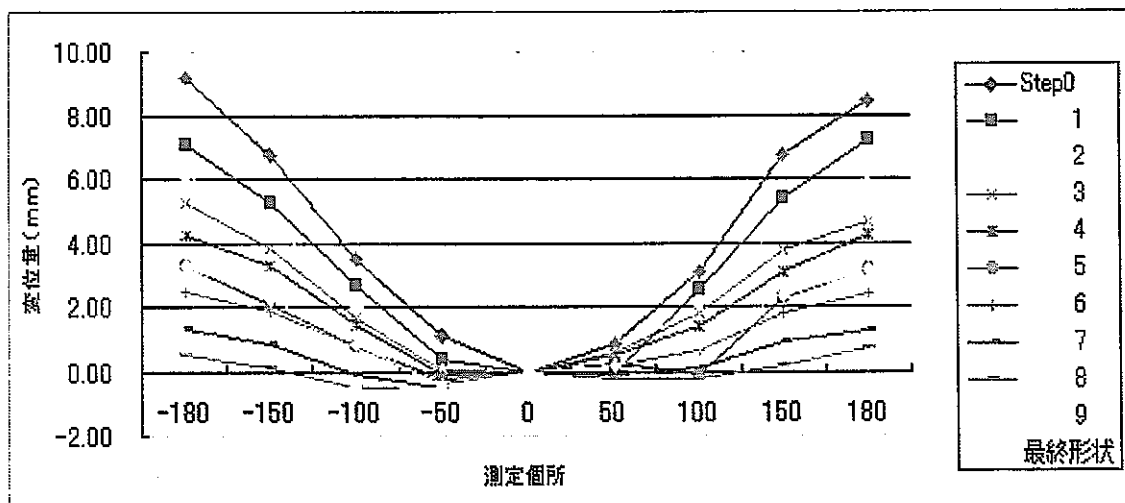


Fig. 6-14 Deflection of specimen at each step of linearization processing
直線化加工工程ごとの試験体の変位

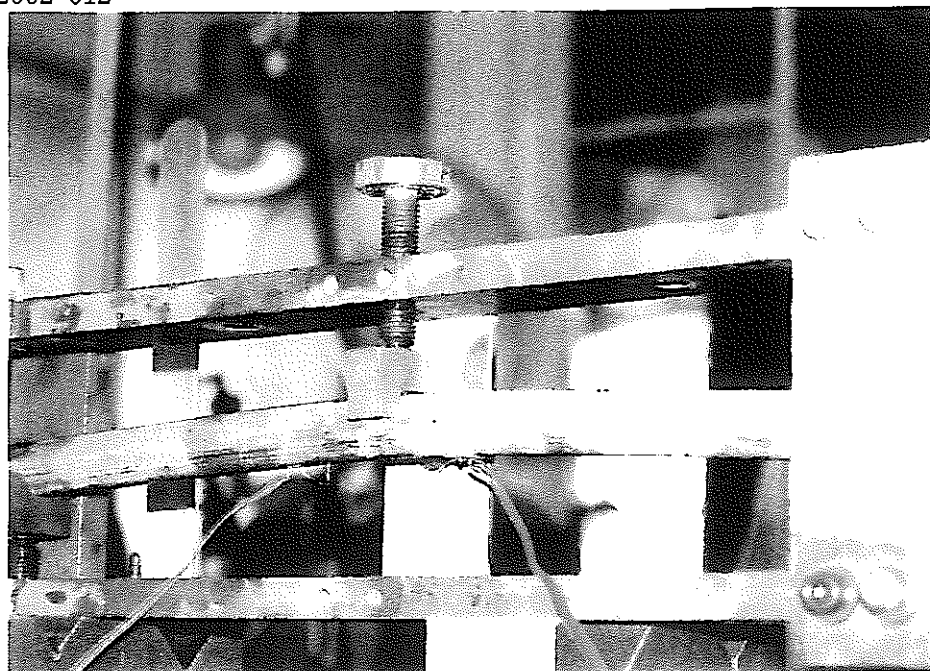


Photo 6-8 View of linearization processing
直線化加工の状況

(3) 形状回復処理

形状回復処理では、試験体を 400℃に加熱し、このときの温度と変位量の変化を測定した。形状回復処理の実施状況を Photo 6-9 に示す。使用した機器は以下の通りである。

ヒーター：(株) 東京技術研究所製 リボンヒーター RK 型 100V, 300W
最高使用温度 600℃ 20mmW×2000mmL,
熱電対 : 助川電気 (株) 製 K 型 T35-1000AK9C-2ES
変位計 : 東京測器研究所製 一般用変位計 SDP-100C (max100mm)
測定器 : 共和電業 (株) 製 データロガー UCAM-10B
スキャンユニット USB-51A

温度の測定としては、荷重点、及び荷重点から各±100, ±180mmの5箇所に熱電対を取り付け、試験体の温度のばらつきを確認した。またノズル部 100mmを固定し、治具から 632mmの点で変位を測定した。なお測定温度は 10℃毎とし、同時に変位量を出力させたが、このときの温度制御は手動の on/off スイッチにて行った。

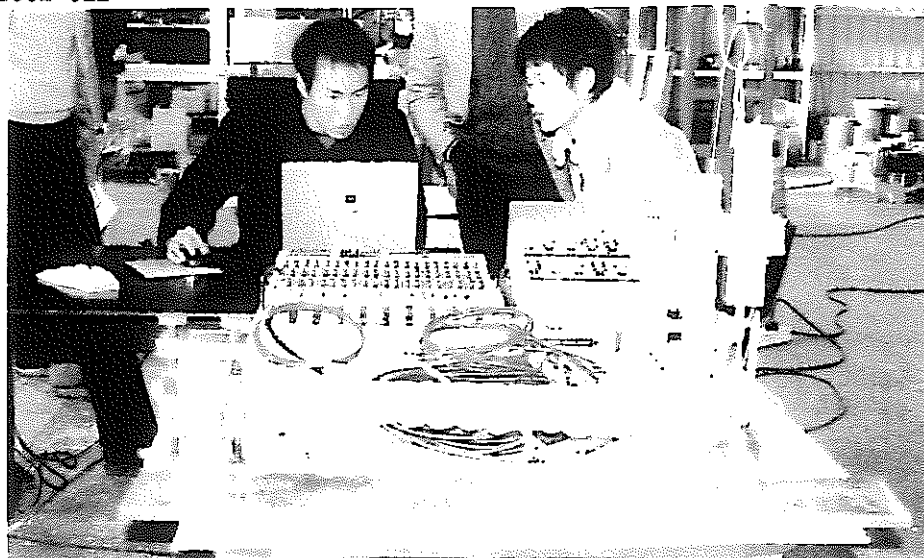


Photo 6-9 View of shape recovery processing
形状回復工程の状況

(4) 測定

形状回復熱処理後にサンプルを炉から取り出し、燃料集合体模擬試験体の各部位の変位をダイヤルゲージにて測定し、試験体各部位の形状回復量を調べた。

6. 2. 3 試験結果

(1) 弧状管の曲げ加工

曲げ加工において、ダイヤルゲージを用いて測定した実測値を各測定点の変位として Fig. 6-16 に示した。実測変位量は荷重点直下の測定点において最大となり、パッドの影響により多少左右非対称となった。管に与えた加工ひずみ ϵ_w は弧状から真直への変形により求めた。即ち、軸方向 x 位置における加工した弧状の変位 y を実測データから (6.3)式に示した5次の回帰式

$$y = f_w(x) = a_w x^5 + b_w x^4 + c_w x^3 + d_w x^2 + e_w x + f_w \quad (6.3)$$

としてそれぞれ表し、外表面加工ひずみ ϵ_w を各点の曲率半径 ρ と曲げ中立軸から管外表面までの距離 h により幾何学的関係から(6.4)式で求め、ひずみゲージの測定値と比較して Fig. 6-16 に示した。また、後述6. 2. 4節のFEM解析による ϵ_w 付与時における x 軸方向のひずみを Fig. 6-18 に示すが、この Fig. 6-18 と上記の算出結果からもパッド部近傍の変形は拘束されていることが確認された。

$$\epsilon = \frac{h}{\rho} = -\frac{d^2 y}{dx^2} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} h \quad (6.4)$$

(2) 形状回復特性

形状回復による変位量を Fig. 6-15 に、加工ひずみ ϵ_w と形状回復ひずみ ϵ_m の関係を Fig. 6-16 に示す。Fig. 6-15 より、記憶回復は約 40℃ から始まり 200℃ ないし 250℃ ではほぼ飽和に達していることが分かる。

測定変位は曲げ加工時と同様の傾向をとり、荷重点直下で最大変位量となった。真直な供試管に熱処理を施してから、形状回復した弧状供試管の変位曲線

$$y = f_m(x) = a_m x^5 + b_m x^4 + c_m x^3 + d_m x^2 + e_m x + f_m \quad (6.5)$$

を5次の回帰式として表し、同様の方法で (6.4)式から形状回復ひずみ ϵ_m を求め、加工ひずみ ϵ_w と比較して Fig.6-16 に示した。与えた加工ひずみ ϵ_w が大きくなると形状回復ひずみ ϵ_m は大きくなること、ひずみゲージによる実測加工値と計算値はほぼ一致することが確認された。なお、付録1に (6.3) ~ (6.5) 式の導出を示した。

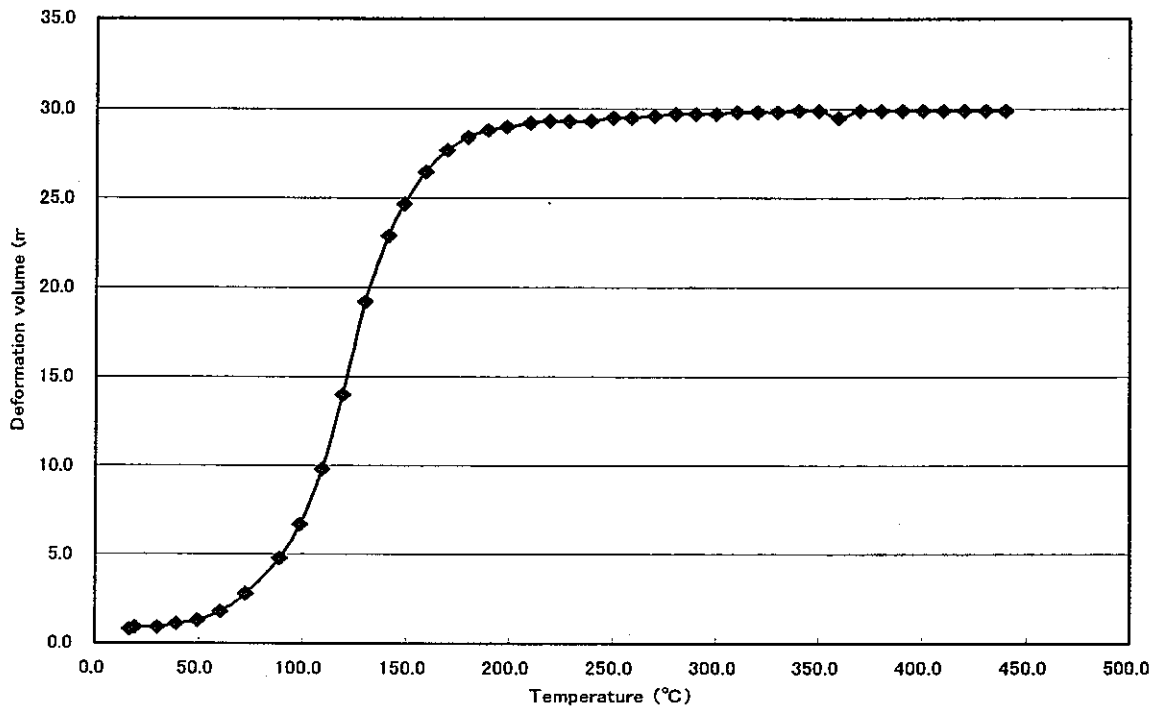


Fig. 6-15 Displacement of specimen at the point of 632 mm distance from crump tool by shape recovery effect
 形状回復効果による試験片つかみ部から 632mmにおける試験体変位

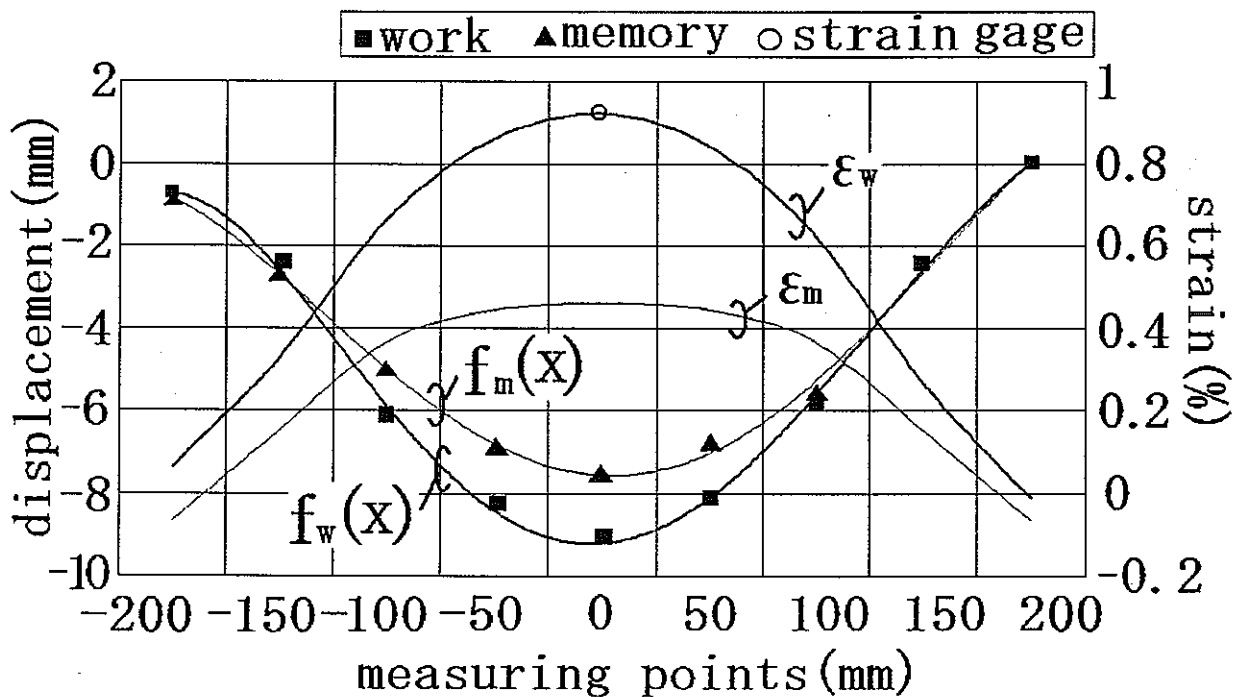


Fig. 6-16 Work strain vs. recovery strain of deformation simulator of subassembly
 試験体の加工ひずみと形状回復ひずみ

6.2.4 数値解析

有限要素法(以下 FEM)解析ソフト MARC/mentat による数値解析を行い、実験と比較した。Fig. 6-17 に示した有限要素モデルは、軸方向 1/2 対称の構造部分について 8 節点シェル要素を用い、左右支持台及び中心の荷重体は剛体と設定した。数値解析の際に入力した機械的特性値は、ヤング率 $E=170.0\text{GPa}$ 、横弾性係数 $G=65.0\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.359$ と設定した。また、座標軸は Fig. 6-17 に示すように管軸を x 軸とした。

曲げ加工により生じるラッパ管の x 方向加工ひずみ ϵ_w に対応した x 方向形状回復ひずみ ϵ_m を、今回測定した単軸引張り加工ひずみ ϵ_w と形状回復ひずみ ϵ_m の関係から求め、有限要素モデルの各要素に対応した形状回復ひずみ ϵ_m を各要素で異なる熱膨張ひずみ ϵ_t を (6.1) 式で膨張係数 α と温度上昇 ΔT の関数として与えた。Fig. 6-17 に示した y 方向、z 方向は、材料の等方性から (6.1) 式で得られた ϵ_t の 1/2 の値をそれぞれ熱膨張ひずみに応じて算出し、各要素の異なる材料特性として入力した。すなわち、加熱による熱膨張ひずみを、オーステナイト相への逆変態である形状回復ひずみ ϵ_m 相当すると仮定して解析した。

加工ひずみ ϵ_w 付与時の x 軸方向ひずみ分布について、数値解析の結果を Fig. 6-18 に示す。

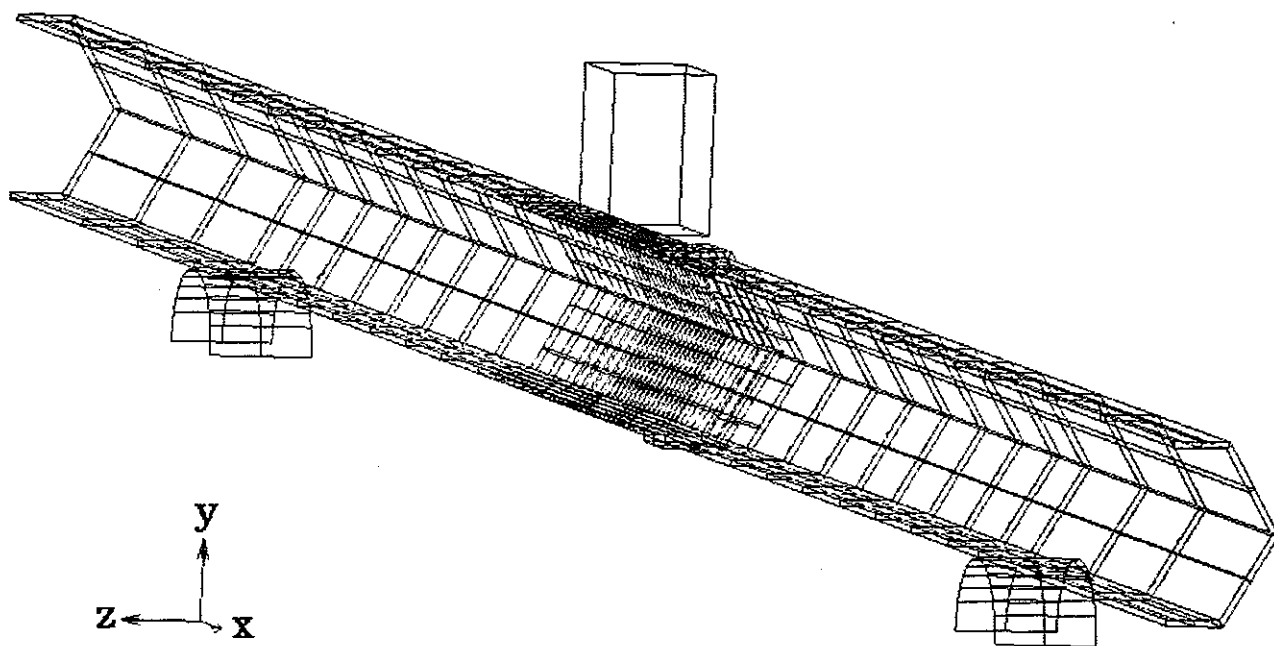


Fig. 6-17 FEM model of 3-point bending for deformation simulator of subassembly
燃料集合体模擬試験体の3点曲げ FEM モデル

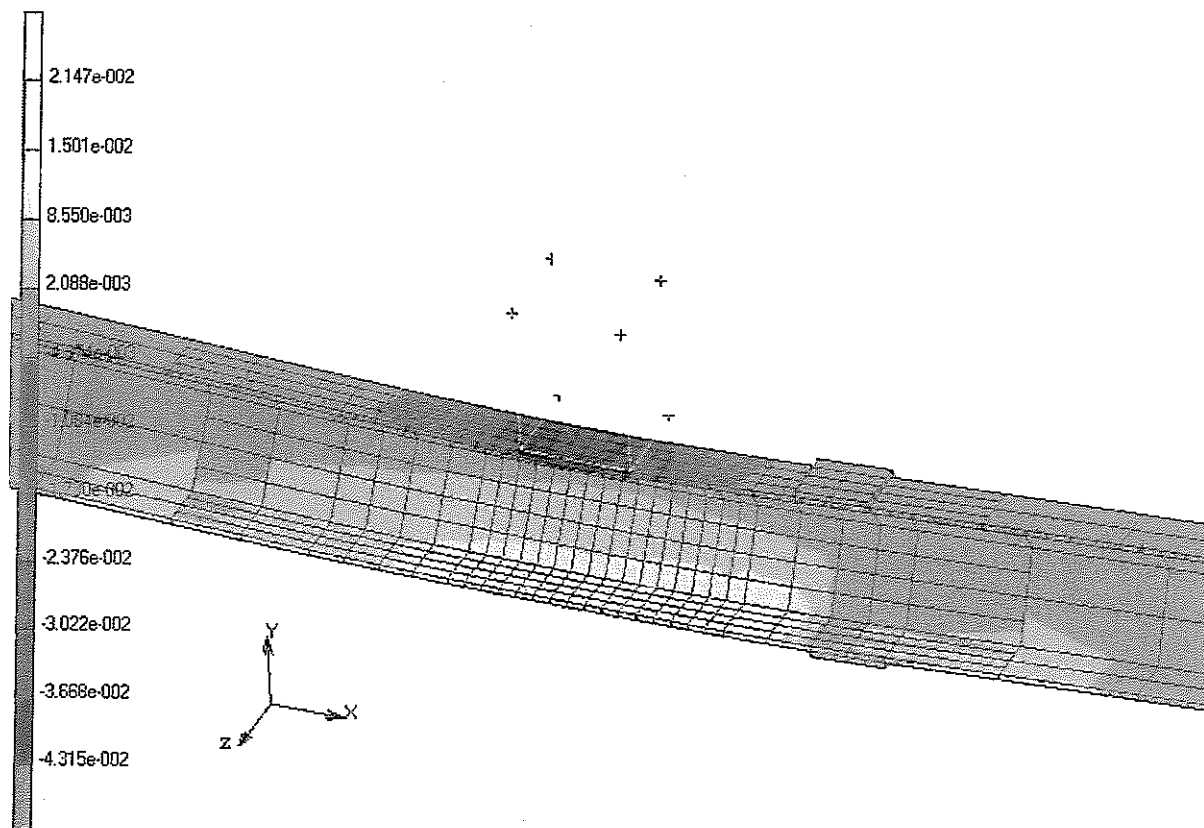


Fig. 6-18 X-axis strain distribution at 3-point bending calculated by FEM analysis
 FEM 解析による 3 点曲げの x 軸方向ひずみ分布

6. 2. 5 形状記憶特性

鉄系形状記憶合金ラップ管の 3 点曲げにおける形状記憶特性について以下に示す。曲げ加工による変位分布の実験値から求めた (6.3) 式と FEM 解析値を比較したものを, Fig. 6-19 に示した。これによれば, 実験から求めた値と FEM 解析値はほぼ一致した。

形状回復変形による変位分布を Fig. 6-20 に示した。FEM 解析値と実験値はほぼ一致している。このことから, 単軸引張り試験の形状記憶特性からラップ管の形状記憶特性が推定できることが明らかになった。

また, 単軸引張り試験から得られた ϵ_w と ϵ_m との関係を示す (5.12) 式と今回得られたラップ管の ϵ_w と ϵ_m の関係を比較して Fig. 6-21 に示すように, ラップ管の形状記憶特性は約 1% の ϵ_w まで, 単軸引張りのそれに対応している。この理由は鉄系形状記憶合金の ϵ_w と ϵ_m の関係が今回の実験範囲では比例関係にあるためと考えている。

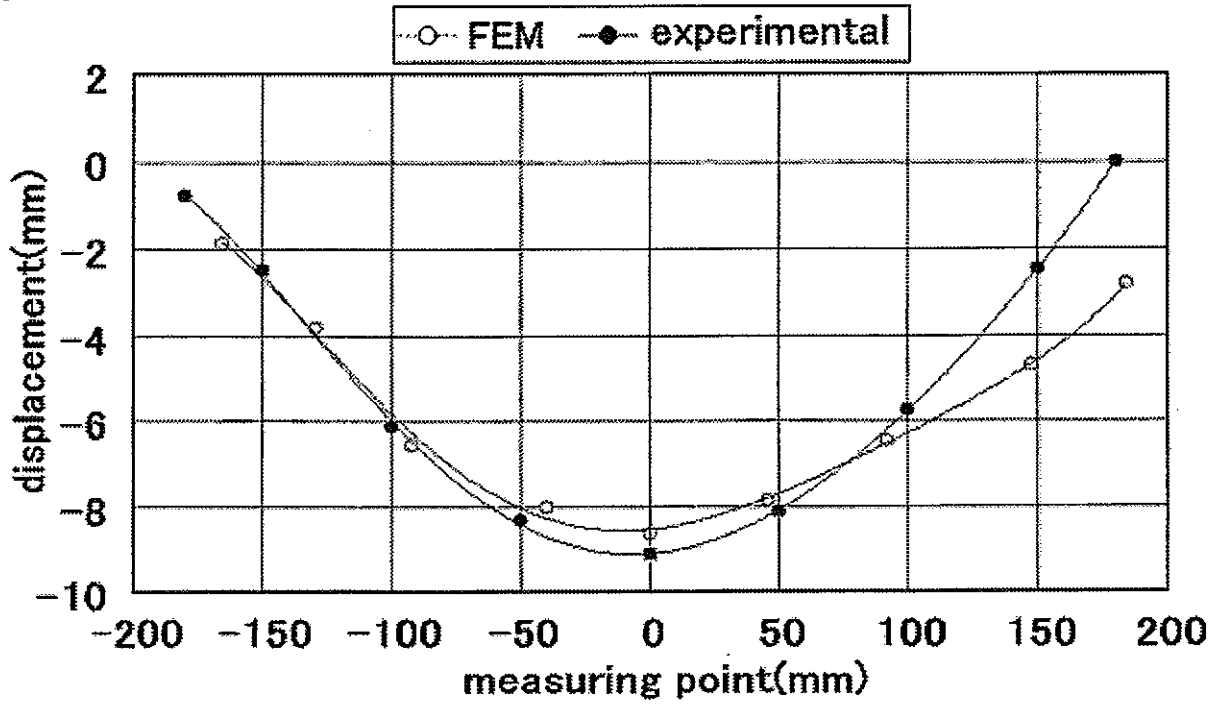


Fig. 6-19 Displacement distribution of experiment and FEM analysis after 3-point bending
 実験と FEM 解析による 3 点曲げ加工による変位分布

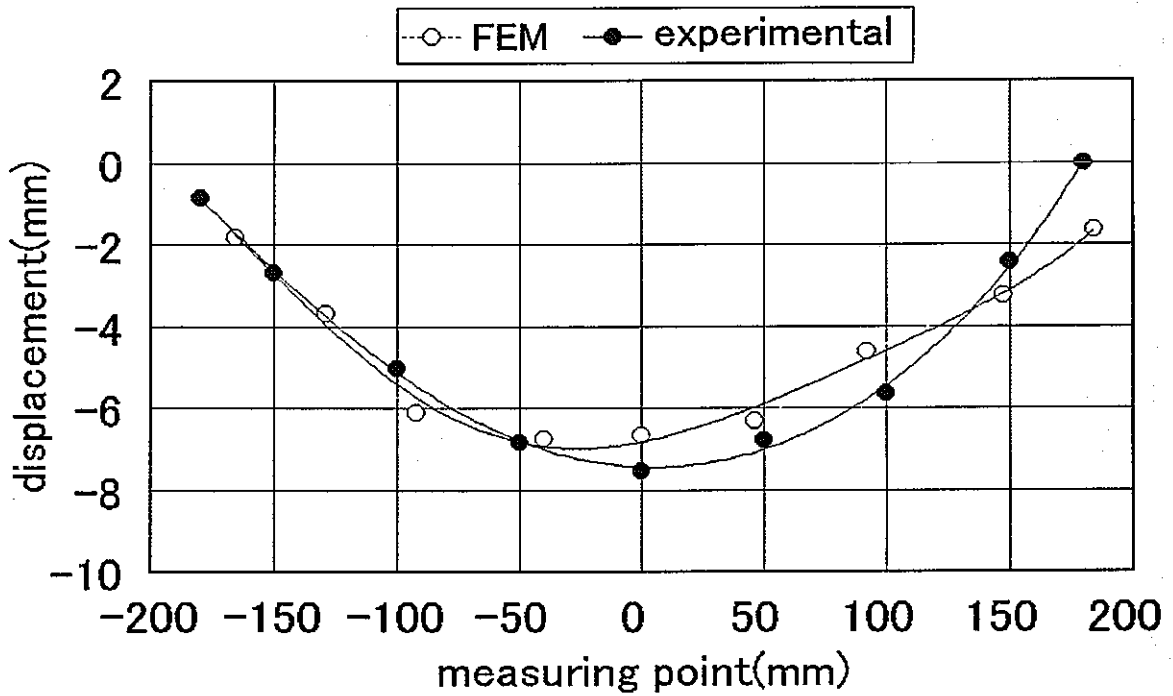


Fig. 6-20 Displacement distribution of experiment and FEM analysis
 after shape recover treatment
 実験値と FEM 解析値の形状回復による変位分布

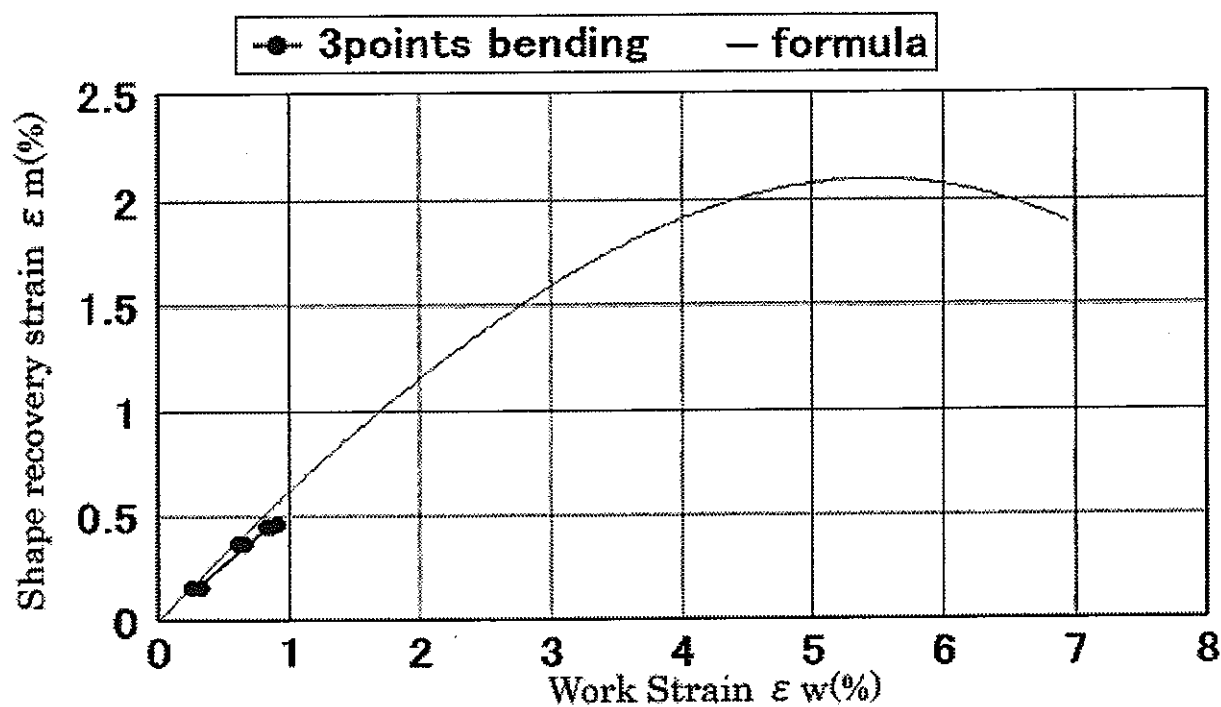


Fig. 6-21 Relation between work strain recovery strain at at tensile test and 3-point bending
 単軸引張りおよび3点曲げにおける加工ひずみと形状回復ひずみ

7 結言

鉄系形状記憶合金を利用した炉心変形模擬試験方法の確立について見通しを得ることを目的として研究を進めた結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 化学成分 Fe-28%Mn-6%Si-5%Cr の鉄系形状記憶合金を模擬試験体の材料として選択したことは妥当である。
- (2) 材料の基本特性として温度依存性を含めた機械的特性および数値解析のための構成モデルを明らかにした。具体的には以下のとおりである。
 - ① 単軸引張りによる形状記憶特性を把握した。供試材に引張り加工ひずみ ϵ を1%から16%まで施し、その後400°C加熱により ϵ マルテンサイトからオーステナイト変態による形状回復ひずみの発現を確認した。その結果、加工ひずみが5%から10%において形状回復ひずみが最大値2.0%を示すことを明らかにした。
 - ② 単軸圧縮による形状記憶特性は単軸引張りと同様の特性であることを明らかにした。
 - ③ 形状回復ひずみに及ぼす単軸引張りひずみと単軸圧縮ひずみの影響を定式化した。
 - ④ 形状回復ひずみに及ぼすトレーニング処理の影響を明らかにし、定式化した。
 - ⑤ 形状回復ひずみに及ぼす形状回復熱処理における付加応力の影響を調査した。
 - ⑥ 形状記憶合金の常温引張り特性及び400°Cまでの高温引張り特性を明らかにした。
 - ⑦ 応力-ひずみ曲線の弾性比例限以降の立ち上がり部における応力緩和(加工硬化的)挙動及び除荷後の変形特性を明らかにした。
 - ⑧ ヤング率、横弾性係数、ポアソン比、線膨張係数を測定した。
- (3) 定式化した機械的特性モデルを用いた有限要素法解析によって矩形断面梁の4点曲げ加工における形状回復特性を調査した。その結果、機械的特性のモデル化が妥当であることが検証された。
- (4) 鉄系形状記憶合金で高速増殖炉もんじゅ燃料集合体の縮尺約5分の1のラップ管、エントランスノズル、ヘッド部分からなる試験体を試作し、3点曲げ加工後熱処理を施して形状回復特性を調査した。その結果、燃料集合体の3点曲げ加工における形状回復特性の有限要素法解析により、機械的特性のモデル式が妥当であることを検証した。

本報では、炉心変形挙動を形状記憶合金試験体で模擬することを狙って、鉄系形状記憶合金の機械的特性のモデル化の検討を行ったが、参考として付録3に形状記憶合金を使った模擬試験の別の応用の可能性についても触れる。

本研究を遂行するに際し御教示頂いた淡路産業(株)の丸山忠克氏、新日本製鉄(株)の大塚広明氏、(株)日鉄テクノリサーチの押見正一氏及び核燃料サイクル開発機構の堀切守人氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) Negishi, H., Tsukimori, K., Matsubara, K. and Sato, T., Development of Core Deformation Analysis Program by Using Parallel Algorithm, Proceedings of International Conference and Exhibition, Amsterdam, High-Performance Computing and Networking, (1998), pp.999-1001.
- 2) Tsukimori, K. and Negishi, H., Development of 'PAD ELEMENT' for Detailed Core Deformation Analyses and Verification, 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Seoul, Korea, (1999), pp2-18.
- 3) Otsuka, H., Yamada, H., Maruyama, T., Tanahashi, H., Matsuda, S. and Murakami, M., Effect of Alloying Additions on Fe-Mn-Si Shape Memory Alloys, ISIJ International, Vol.30, No8, (1990), pp.674-679.
- 4) Nishimura, F., Watanabe, N. and Tanaka, K., Analysis of uniaxial stress-strain-temperature hysteresis in an Fe-based shape memory alloy under thermomechanical loading, Computational Materials and Science, Vol.8, (1997), pp.349-362.
- 5) 丸山忠克・大塚広明, ここまで来た鉄系形状記憶合金, 金属, Vol.66, No12, (1996), pp.1079-1088.
- 6) 牧正志, 形状記憶合金のニューフェース, NMC, Vol.3, No2, (1990), pp.15-22.
- 7) 友田陽, 森岡頼弘, 高 Mn 鉄系合金の γ ϵ マルテンサイト, 金属, Vol.67, No1, (1997), pp.5-20.
- 8) 西村文仁, 渡辺紀子, 田中喜久昭, 材料, Vol.46, No.8, (1997), pp.900-905.
- 9) 特許第 3049234 号, (2000,3,24).
- 10) 船久保照康編, 形状記憶合金, 産業図書, (1984).

本研究に関する研究講演

- 1) Naoi, H., Ide, Y., Horikiri, M. and Tsukimori, K., Mechanical properties of ferrous shape memory alloy, proceedings of the 5th Engineering Systems Design & Analysis Conference, PD-Vol. 82, July 10-13 2000, pp.79-84.
- 2) 直井久, 井出雄介, 堀切守人, 月森和之, 鉄系形状記憶合金における加工・熱処理の形状記憶特性及ぼす影響, 第 4 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム, 2000, JCROSSAR, Vol. 4, pp.141-148.
- 3) 直井久, 溝手信一郎, 月森和之, 鉄系形状記憶合金ラップ管の 3 点曲げにおける形状回復特性, 日本鉄鋼協会第 142 回秋季講演大会, CAMP-ISIJ, Vol. 14, 2001-1215(295).

付録1 ひずみ分布の計算式

(1) 加工変形付与時

x を管軸方向の中心からの距離とし、実測した各測定点の加工変形付与時の変位を、回帰分析により4次式で近似し以下の①式を得た。

$$y = 2 \times 10^{-9} x^4 + 3 \times 10^{-8} x^3 - 0.0004 x^2 + 0.0008 x - 9.149 \quad \dots \textcircled{1}$$

幾何学的関係から

$$\varepsilon = \frac{h}{\rho} = -\frac{d^2 y}{dx^2} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} h$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = 24 \times 10^{-9} x^2 + 18 \times 10^{-8} x - 0.0008$$

となった。

(2) 形状回復変形時におけるひずみ分布

加工変形時と同様に、実測した各実測点の加熱による形状回復変形時の変位を、回帰分析により5次式で近似し以下の式を得た。

$$y = 4 \times 10^{-12} x^5 - 8 \times 10^{-11} x^4 + 2 \times 10^{-8} x^3 - 0.0002 x^2 - 0.0022 x - 7.445 \quad \dots \textcircled{2}$$

幾何学的関係から

$$\varepsilon = \frac{h}{\rho} = -\frac{d^2 y}{dx^2} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} h$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = 8 \times 10^{-11} x^3 - 96 \times 10^{-11} x^2 + 12 \times 10^{-8} x - 0.0004$$

となった。

付録2 形状記憶合金を利用したピンバンドル・ダクト接触時の燃料集合体曲げ剛性の評価

炉心燃料の燃焼が進むと、スエリングによって燃料ピン束とダクトが接触干渉し、初期の干渉のほとんどない状態に比べて燃料集合体の曲げ剛性は大きくなる。燃焼が進んだ段階での過渡時の炉心変形挙動やパッド部での集合体同士の接触荷重を正しく評価するためには、ピンバンドルとダクトの接触干渉を考慮した集合体の曲げ剛性を求める必要があるといえる。しかしながら、多数のピンとダクトの接触を考慮した解析は容易ではなく、試験的にもピンバンドルとダクトの接触干渉を表現することは難しい。試験を成功させるためには、ダクト内部にピンバンドルを挿入したのち、ピンバンドルとダクトを何らかの方法で接触させ、その状態で凍結させた試験体を製作しなければならない。

そこで、ダクトに相当する構造を形状記憶合金で製作し、ピンバンドルとダクトの接触干渉を考慮した寸法で形状記憶処理を行い、拡張してピンバンドルをとおす。次に形状記憶合金ダクトを加熱して形状を回復させることでピンバンドルとダクトが接触した状態を模擬するという方法が考えられる。この場合は、ダクトの断面が小さくなるので、ピンバンドルが膨らむのとは違うが、相対的には同様のダクトとピンバンドルの干渉状態を作ることになる。

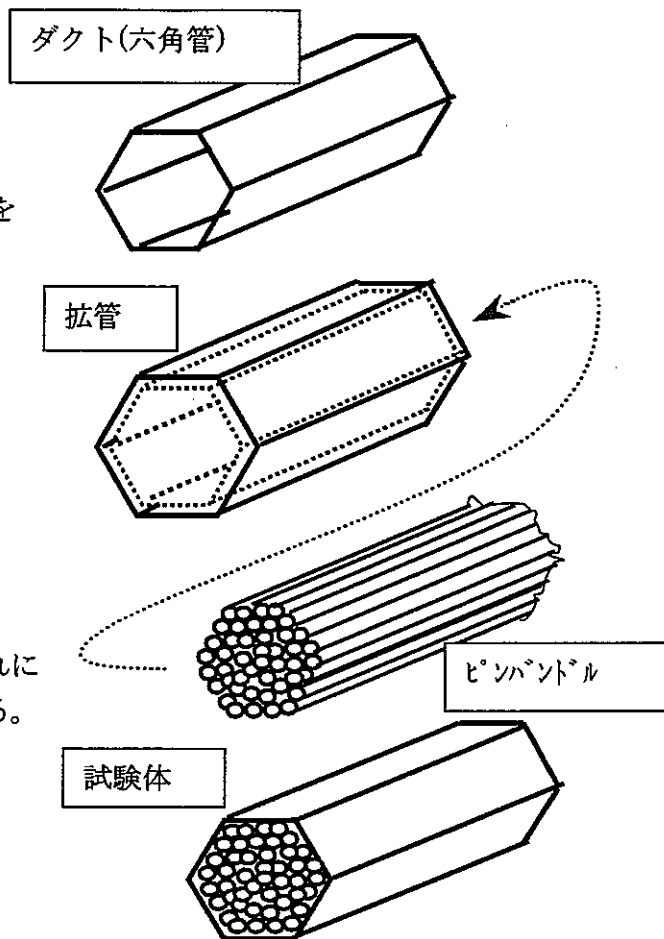
集合体試験体の曲げ剛性評価試験としては、ピンバンドルとダクトを接触させた燃料集合体試験体の曲げ試験のほか、ダクト単体とピン単体の曲げ試験を行う。集合体試験体についてはピンバンドルとダクトの干渉の程度を変えた複数の試験体について行う。試験結果をピンバンドルとダクトの干渉の程度について整理し、ピンバンドルとダクトの接触干渉に依存した曲げ剛性の割増を評価する。

そのほか、この方法はBDI(Bundle-Duct Interaction)挙動の試験として応用する可能性も考えられる。ピンバンドルとダクトが接触干渉した状態の集合体試験体をCTスキャンすることで集合体任意断面の干渉の状況を捉えることができる。また、試験体に樹脂等を流し込み、凍結させて切断し、断面観察を行うことも考えられる。

この方法の手順を図解して具体的に示すと次のとおりである。

1. 試験体製作

- (1)形状記憶合金によるダクト(六角管)の製作
板材の曲げ加工および溶接によって六角管を作る。必要に応じて熱処理を行う。
- (2)形状記憶処理
加熱炉で加熱し、所定の形状を記憶させる。
- (3)拡管処理
六角管を拡管し、ピンバンドルの挿入を可能にする。
- (4)ピンバンドルの挿入
拡管した六角管にピンバンドルを挿入する。
- (5)形状回復処理
加熱によりダクトの形状を回復させる。これにより、バンドルを締め付けた状態を実現する。



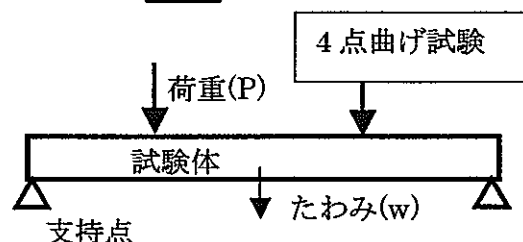
2. 試験

4点曲げ試験により、曲げ剛性を割出す。試験は締付け量(干渉量)の異なる複数の集合体試験体のほか、校正用にダクトのみ、ピンのみについても行う。

なお、曲げ剛性(EI)は

$$EI=34.91w/PL^3$$

ここで、wは中央のたわみ、Pは両支持点から1/4長さの位置に負荷する荷重、Lは試験体の支持点間の長さである。



3. 評価概念

試験結果から、ダクトとピンバンドルの干渉の大小による曲げ剛性の変化を整理する。

実際の材料のダクトのみの曲げ剛性との比較から、ダクトとピンバンドルの干渉の大小に依存した実際の集合体の曲げ剛性を推察する。

