

鉄系形状記憶合金の形状回復特性に関する研究

蒲生, 隆政 / GAMOU, Takamasa

(発行年 / Year)

2011-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2011-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2010 年度

修士論文

鉄系形状記憶合金の形状回復特性に関する研究

蒲生 隆政

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程
学籍番号 09R1113

指導教員 直井 久 教授

RESEARCH OF SHAPE RECOVERY CHARACTERISTICS
FOR FERROUS SHAPE MEMORY ALLOY

Takamasa GAMOU

Master's Thesis
Graduate School of Engineering
Hosei University

目次

1.	緒論	3
1. 1	形状記憶合金	3
1. 2	鉄形状記憶合金	6
1. 2. 1	形状回復挙動	6
1. 2. 2	自由エネルギーと相変態	8
1. 2. 3	物理的特性および機械的特性	9
1. 3	研究目標	10
1. 4	本論の構成	11
2.	引張-圧縮の2軸応力による予ひずみと形状回復ひずみの特性研究	12
2. 1	緒言	12
2. 2	試験方法	14
2. 3	試験結果及び考察	17
2. 3. 1	平面応力による予ひずみと形状回復ひずみの分布	17
2. 3. 2	引張-圧縮の2軸応力によるひずみの形状回復後の電子顕微鏡観察組織	18
2. 3. 3	平面応力の引張方向における形状回復ひずみ特性	19
3.	トレーニング処理材の形状回復応力特性の研究	21
3. 1	緒言	21
3. 2	試験方法	22
3. 3	試験結果及び考察	24
3. 3. 1	トレーニング処理材の消費回復ひずみと形状回復応力	24
3. 3. 2	試験片平行部の温度の偏り	25
3. 3. 3	トレーニング処理の有無と形状回復応力の関係	25
4.	鉄系形状記憶合金の継手への適用試験	28
4. 1	緒言	28
4. 1. 1	無電柱化推進計画と電力埋設管	28
4. 1. 2	電力埋設管用継手	32
4. 2	試験方法	33
4. 2. 1	継手強度試験	36
4. 2. 2	耐食性試験	37
4. 2. 3	耐水圧試験	38
4. 2. 4	地盤沈下シミュレーション試験	39
4. 3	試験結果及び考察	40
4. 3. 1	継手強度試験結果	40

4. 3. 2	耐食性試験結果	43
4. 3. 3	耐水圧試験結果	43
4. 3. 4	地盤沈下シミュレーション試験結果	43
5.	結論	44

1. 緒論

1. 1 形状記憶合金

形状記憶合金とは、変形ひずみを与えても特定の処理により変形前の形状へと復元する機能を持つ合金の総称である^{1)、2)}。

一般に、金属材料に外力を加えると最初は強い変形抵抗を示し、外力に比例してひずみが増加する。外力を取り除くとひずみは無くなり、弾性変形で元の形状へと戻る。しかし、外力が材料の降伏点を越えると、材料は塑性変形し外力を取り除いても元の形状へは戻らない。塑性変形が起こる原因は以下の2通りが挙げられる。

(1) 転位を導入してすべりによるせん断変形が起こるため

(2) 結晶中の原子の連帯運動によりマルテンサイト変態が起こるため

形状記憶合金は後者であり、転位によるすべり変形とは異なる。形状記憶効果は母相へ戻るマルテンサイト逆変態に伴う形状回復現象である。このように形状記憶合金は温度・応力・磁場に依存して生じる、マルテンサイト変態とその逆変態によって形状回復する機能を有する合金である。

形状記憶合金に現われるマルテンサイト変態には熱弾性型と非熱弾性型がある。熱弾性型マルテンサイト変態は、母相からの冷却により生じたマルテンサイト相が加熱により逆変態し、元の形状に回復する。一方、非熱弾性型である応力誘起型マルテンサイト変態は、母相が応力によりマルテンサイト相を生じ、加熱により逆変態をすることで元の形状に回復する。

現在まで、Ti-Ni 系や金、銀、銅系、鉄系合金など様々な成分系の形状記憶合金が開発されているが、多結晶で良好な形状回復特性が得られるものは Ti-Ni 系合金と鉄系合金に大別される。Ti-Ni 系および Cu 系は熱弾性型マルテンサイト変態であり、二方向性の形状回復挙動を示す。一方、鉄系は応力誘起型マルテンサイト変態であり、変態温度ヒステリシスが大きいため一方向性である。

一般の金属のすべり変形と Ti-Ni 系合金と鉄系形状記憶合金が形状記憶効果を示すときに変形を担う原子の動きの模式図を図 1.1~1.3 に示す。

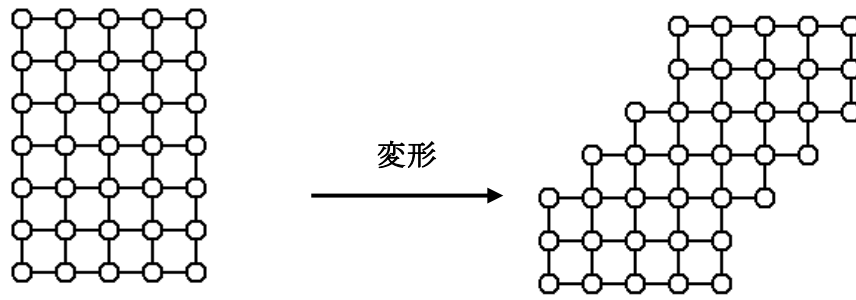


図 1.1 一般的なすべりによる変形

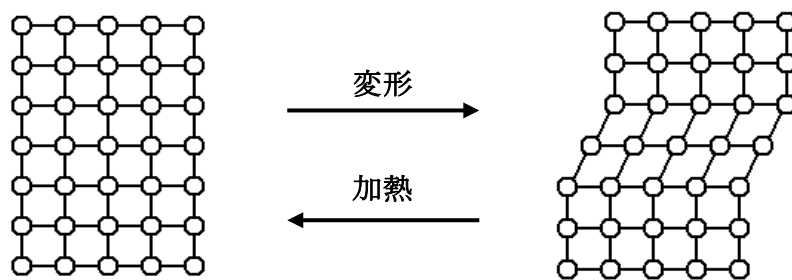
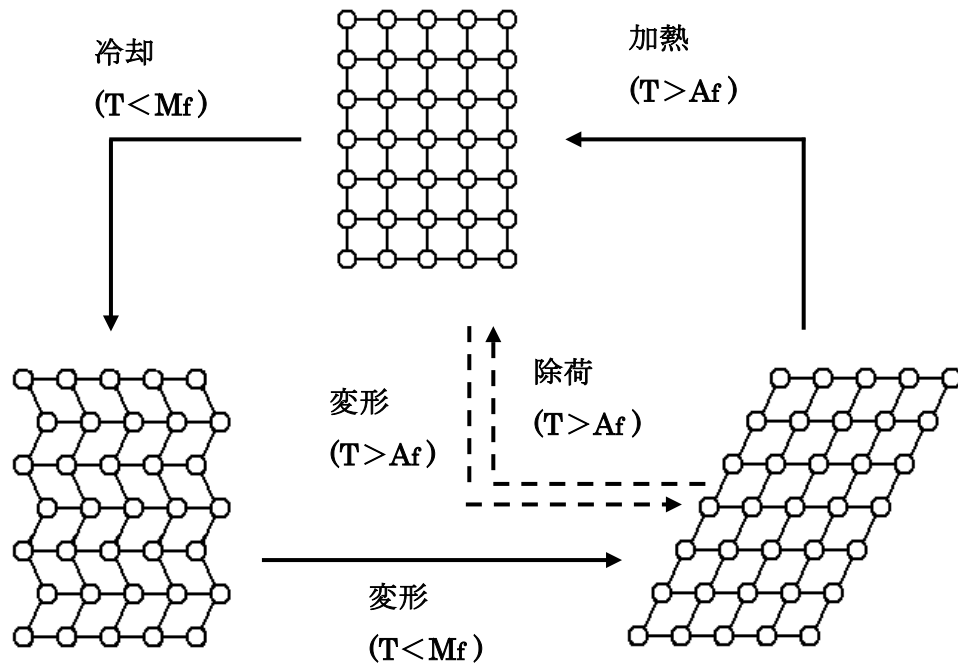


図 1.2 鉄系形状記憶合金の応力誘起マルテンサイト変態



備考 Mf : マルテンサイト変態終了温度 Af : マルテンサイト逆変態終了温度

図 1.3 Ti-Ni 系形状記憶合金の熱弾性型マルテンサイト変態(実線矢印)と超弾性(破線矢印)

表 1.1 に Ti-Ni 系形状記憶合金と鉄系形状記憶合金の比較を示す. Ti-Ni 系合金は, 形状回復量は最大 8%と大きく, 形状回復を繰り返し行ったときの形状回復特性の劣化は少ない. しかし鉄系合金と比べて単位重量当たりのコストが高く加工性も劣るため, 主として小型のアクチュエータや小型の精密機械, 医療用器具に適用される. また, 超弾性機能を利用して携帯電話用アンテナ, めがね用フレーム等にも実用された実績がある.

鉄系合金は他の形状記憶合金と比べ, 比較的安価であり加工性が良好であることから, 形状記憶合金管継手やクレーンレール間の隙間を縮めるための締結部材などの大型の機能性構造用材等への適用がすでに行われている.

表 1.1 Ti-Ni 系形状記憶合金と鉄系形状記憶合金の比較¹⁵⁾

	Ti-Ni 系	鉄系
形状回復ひずみ	8%	4%
形状回復力	400MPa	200MPa
形状回復温度	80℃	400℃
相変態	熱弾性型	応力誘起型
形状回復方向	二方向性	一方向性
加工性・溶接性	難	易
コスト	1	1/10~1/20

1. 2 鉄系形状記憶合金

鉄系形状記憶合金の研究は、1982年に佐藤・森らによって単結晶のFe-Mn-Si合金に形状記憶効果があることが発見された³⁾ことに始まる。この時に用いられた合金はFe-30Mn-1Si (mass%)であり相変態温度(M_s)が370K付近であった。この相変態温度を下げるべく、Fe-30Mn-6Si (mass%)に成分調整された。1984年から新日本製鐵(株)で実用化に向けた多結晶Fe-Mn-Si合金の開発が始まり、1986年には村上らによって実用化された多結晶Fe-Mn-Si合金の基本成分が確立された。その後、延性や強度、耐食性などの改善に向け数々の鉄系形状記憶合金が開発されてきた。その中でも実用化への期待が高まり、研究が進められているものが、Fe-28Mn-6Si-5Cr (mass%)合金である。これまでの研究では、主に同合金の成分設計を目的としており、単結晶の理想状態における形状回復特性は概ね解明されてきた。次は鉄系形状記憶合金の実用化に向け多結晶体での形状回復特性の把握が重要となってきた。

鉄系形状記憶合金の成分は、形状回復能の向上、加工性や耐食性の考慮および M_s 点が室温付近となるような成分調整の結果、Fe-28Mn-6Si-5Cr (mass%)が開発された。本論においても、鉄系形状記憶合金の最適成分系として、Fe-28Mn-6Si-5Cr (mass%)を用いる。

1. 2. 1 形状回復挙動

鉄系形状記憶合金において形状回復効果を発現させるためには、材料の形状を拘束して約1000°Cでの熱処理・焼鈍しを施し元の形状を規定する『形状記憶処理』、引張・圧縮などの加工により予め変形を施す『予ひずみ付与工程』、350~400°Cで10分程度の加熱と保持を施して、逆変態することで形状を回復させる『形状回復処理』の3工程が必要となる(図1.4)。

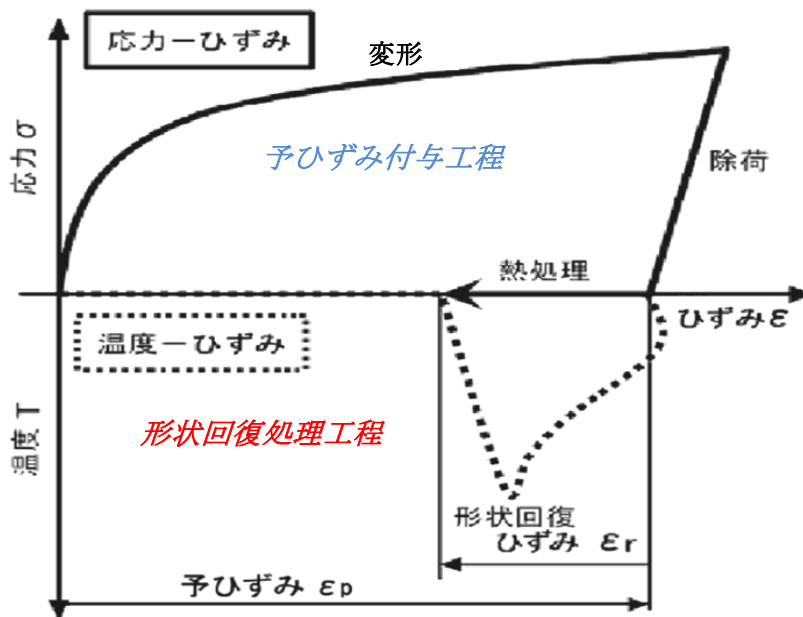


図 1.4 予ひずみ付与工程と形状回復処理工程を1サイクル行ったときの
応力-ひずみ線図及び温度-ひずみ線図

形状記憶処理では材料の組織はすべて母相である γ 相となる。予ひずみ付与工程による変形では、変形と共に γ 相から応力誘起マルテンサイト相である ϵ 相への変態が部分的に生じる(図 1.2)。そして、形状回復処理を施すことにより、 ϵ 相から γ 相へと逆変態することにより、付与した変形が回復する。すなわち鉄系形状記憶合金の形状上回復効果は、この $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ 相変態によるものである。

$\epsilon \rightarrow \gamma$ 相変態はショックレイ部分転位による。予ひずみの小さい範囲では全ての変位をショックレイ部分転位で賄うことが可能である。予ひずみが大きくなるとショックレイ部分転位では全てを賄うことができなくなり、過剰な変位を完全転位の導入により賄うこととなる。

鉄系形状記憶合金では、ショックレイ部分転位の導入に伴う fcc \rightarrow hcp 変態が発生する。fcc \rightarrow hcp 変態の変化を図 1.5 に示す。この図は変態前後の原子の動きを fcc の $\langle 101 \rangle$ 方向から見たものである。ここで●は紙面上にある原子、○はその上隣の原子を示す。本合金に応力を加えて変形させると、fcc 構造を取る γ オーステナイト相の $\{111\}$ 面が、2層ずつ fcc の $\langle 121 \rangle$ 方向に $a/6$ (a は格子定数) だけ順次ずれて、hcp 構造を取る ϵ マルテンサイト相へと変態する。即ち、fcc の (111) 面に、1 原子面置きで $(a/6)\langle \bar{1}\bar{1}2 \rangle$ ショックレイ部分転位が走り、fcc \rightarrow hcp 変態が生じる。これを応力誘起マルテンサイト変態と称する。 γ 相の (111) 面と ϵ 相の (0001) 面はどちらも最密構造となり、同じ原子配列を持つ。

γ 相と部分転位によって形成された ϵ 相は完全転位を含まず、変態前後で原子の隣接関係は維持される。 ϵ 相は γ 相が安定となる温度まで加熱することで、 γ 相へと逆変態させることが可能であり、 γ 相から ϵ 相が生成された経路をまったく逆に辿る形で逆変態が発現すれば、部分転位は消滅し形状が復元することとなる。逆変態の方向は部分転位の周囲に残る微視的な弾性ひずみによって規定されると考えられている⁴⁾。これが鉄系形状記憶合金の形状回復機構である。

いま γ 相の原子構造の中に、図 1.5 の左図で図示するような太線で囲んだ平行四辺形を想定し、変態後の ϵ 相での形状と比較を行う。 γ 相の直線 OA は ϵ 相では OB となり、幾何学的には約 23%の伸びが見られる。言い換えると単結晶の本合金に理想的な方位から変形を付加すると、23%までの変形は全て fcc \rightarrow hcp 相変態で賄えることになる。

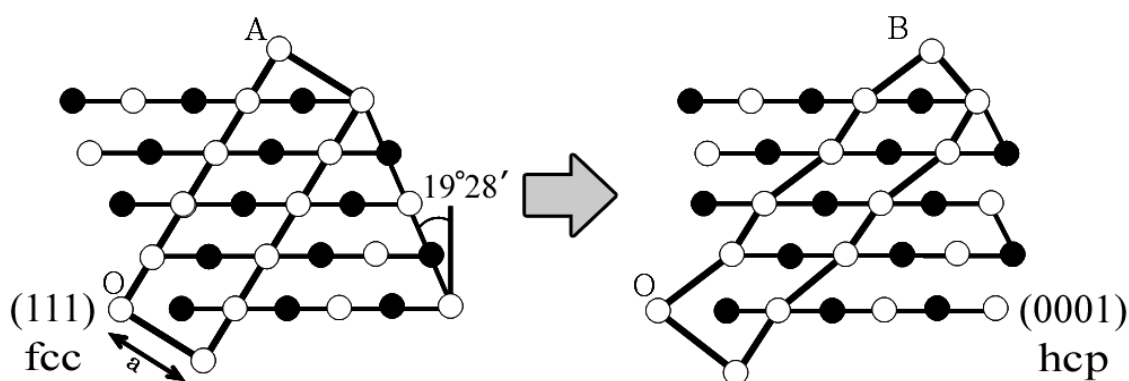


図 1.5 fcc \rightarrow hcp 相変態の前後における原子配列の変化⁵⁾

1. 2. 2 自由エネルギーと相変態

鉄系形状記憶合金は γ オーステナイト相から ε マルテンサイト相への応力誘起マルテンサイト変態とその逆変態により形状回復が発現する. 本合金における自由エネルギーに着目した相変態の概念¹⁾を図 1.6 に示す.

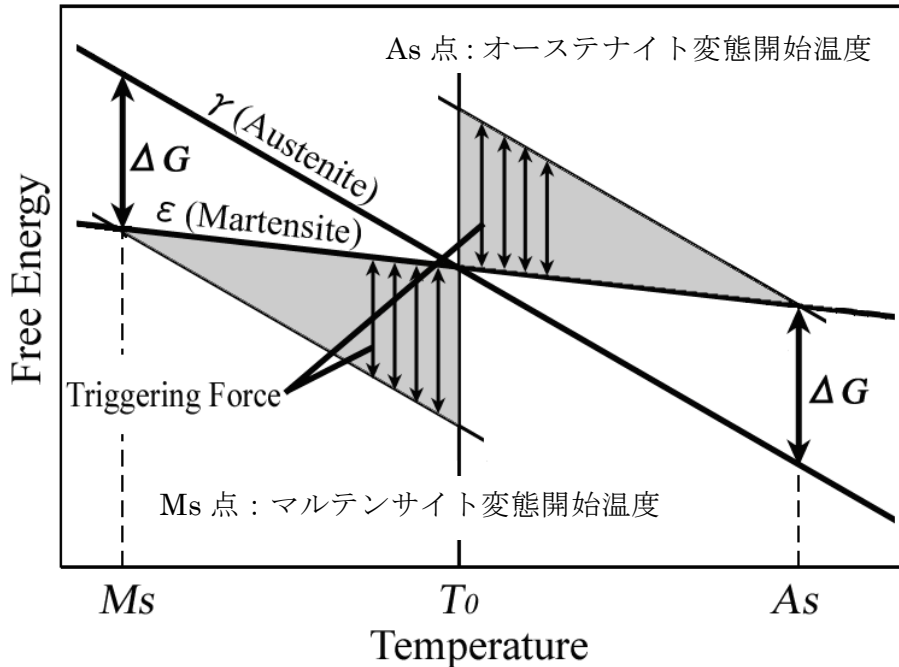


図 1.6 鉄系形状記憶合金の相変態の概念図¹⁾

T_0 は ε 相と γ 相の両相の化学的自由エネルギーが等しくなる温度である。 $T > T_0$ で γ 相が安定となり $T < T_0$ で ε 相が安定となる。 $M_s < T < T_0$ の温度領域では ε 相の安定領域であるが、変態に必要な駆動力と等しい自由エネルギー差 ΔG が不足するため実際には γ 相が準安定で存在する。しかし、 $M_s < T < T_0$ の温度域では、図 1.6 の灰色部で示す駆動力 ΔG に足りない自由エネルギー差を外力によって補うことにより ε 相へと変態する。これが応力誘起マルテンサイト変態である。形状回復挙動は $T > A_s$ の加熱により、 ε 相が母相 γ へと逆変態することで発現する。今回用いた供試材 Fe-28%Mn-6%Si-5%Cr の M_s 点は $-23 \sim 30^\circ\text{C}$ 、オーステナイト変態終了温度 A_f 点は $127 \sim 182^\circ\text{C}$ である。

1. 2. 3 物理的特性および機械的特性

表 1.2 に Fe-28Mn-6Si-5Cr 合金の一般的な物理的特性及び機械的特性^{6)、7)、8)}を示す。本合金は機械的特性がオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 に類似する点が特徴である。

同合金の強度は引張強さ TS が 680MPa 以上であり、構造用部材への適用には問題ない。伸び T-E1 は 16~30%であり、通常の鉄鋼材料と同等の加工性を持つ。溶接性に関しては TIG 溶接が可能である。

表 1.2 Fe-28Mn-6Si-5Cr 合金の物理的特性及び機械的特性^{6)、7)、8)}

項目		単位	特性値	
物理的 特性	密度 (25°C)	g/cm ³	7.2~7.5	
	融点	°C	1320~1350	
	比熱	kJ/kg・K	0.54	
	熱膨張係数 (~500°C)		(16~20) × 10 ⁻⁶	
	熱伝導率	Cal/cm・deg. sec	0.02 (8.37 [W/m・K])	
	比抵抗	Ω・cm	100~130 × 10 ⁻⁶	
	縦弾性係数	GPa	169.2	
	横弾性係数	GPa	65.0	
	ポアソン比	25°C		0.359
		350°C		0.363
	変態温度	M _s	°C	-20~25
A _f		°C	130~185	
磁気性			常磁性	
機械的 特性	引張強さ	MPa	680~1000	
	降伏強度	MPa	200~300	
	伸び	%	16~30	
	耐力	MPa	200~300	
	ビッカース硬さ		190~220	
	加工性		SUS304 並	
	溶接性		可能 (TIG 溶接)	
形状 記憶 特性	形状回復方向		一方向性	
	形状回復ひずみ	%	最大 4%	
	形状回復応力	MPa	147~200	

1. 3 研究目標

近年、鉄基形状記憶合金は実用部材への適用が開始され、大型の構造用部材として実用化された同合金の形状記憶管継手では、締結品質の均一化と作業性の向上が図られた⁹⁾。また、同合金を用いたクレーンレール用継目板ではレール同士の継目を密着させることができ、端部の欠けを無くしてレールの交換頻度を減少させることが可能となった¹⁰⁾。

一方、これまで同合金の形状回復特性の調査は合金開発に重みを置いて行われており、理想状態として単結晶体を扱うことが多く、実用材として使用される多結晶合金として形状回復特性は若干のデータが蓄積されるに留まる。このため、これらの実用例においては、形状回復特性の把握を経験的な調査に依存するところが大きく、鉄基形状記憶合金の実用部材への適用にあたって、その設計に必要となる形状回復特性の解明は未だ十分とは言えない。

また、鉄基のみならずの形状記憶合金における研究は、形状記憶合金をセンサやアクチュエータに適用することを目的としたものが多く、形状回復能のヒステリシスや形状回復の繰返し特性に着目した報告¹¹⁾は少なくない一方、構造部材への適用を目的として様々な条件下での形状回復能の発現特性を論ずる研究報告は少数である。

これらの課題を踏まえて、本研究では研究目標を以下のように設定する。

- (1) 鉄基形状記憶合金を各種の構造部材へ本格的に適用するための機械設計基準を確立する。
- (2) 確立した設計基準が妥当であることを確認するために、鉄基形状記憶合金の形状回復特性を踏まえ、同合金の構造用部材への適用を行う。

1. 4 本論の構成

「(1)鉄基形状記憶合金を各種の構造部材へ本格的に適用するための機械設計基準を確立する」を達成するためには、様々な条件下における形状回復特性を解明することが必要である。本合金を構造部材へ適用する場合、予ひずみ付与工程では引張や圧縮の単軸応力のみならず、押広げなど平面応力が施される場合が考えられる。

第2章では引張-圧縮の2軸応力により付与されたひずみとその形状回復ひずみを調査し、平面応力領域に対する形状記憶特性の解明に努める。

また構造用部材に適用する際は、形状回復応力の把握も重要となる。形状回復応力とは、形状が回復する際に発現する形状回復ひずみを何らかの外部拘束により変位を抑制した結果、形状記憶合金に生じる応力と定義する。

第3章ではトレーニング処理材の形状回復応力試験について述べる。トレーニング処理とは予ひずみ付与工程と形状回復処理工程を数サイクル施すことである。トレーニング効果により形状回復ひずみが向上すること¹²⁾は解明されているが、形状回復応力との関係は研究が不十分である。

また「(2)確立した設計基準が妥当であることを確認するために、鉄基形状記憶合金の形状回復特性を踏まえ、同合金の構造用部材への適用を行う。」を達成するために、

第4章では鉄系形状記憶合金の継手への適用試験について述べる。電線や通信ケーブル等を地中に設置する際に用いられる電力埋設管の継手を同合金で製作し、その性能を検討する。

2. 引張-圧縮の2軸応力による予ひずみと形状回復ひずみの特性研究

2. 1 緒言

鉄系形状記憶合金の予ひずみ付与工程では様々な加工方法が考えられる。張出し成形を用いると張出し部が等二軸引張状態に、引抜き加工や押広げ加工を用いると加工部は軸力と周方向応力が作用する二軸応力状態になるように、加工の形態によっては必ずしも単軸応力による予ひずみ付与が施せるとは限らない。この他にも鍛造や圧延など、加工部の応力場が二軸または多軸応力となる加工法が少なくないため、単軸応力による予ひずみ付与に対する形状回復特性の把握だけではなく、二軸以上の応力による予ひずみ付与に対する形状回復特性の把握も重要となる。

過去の研究で平面応力の予ひずみに対する形状回復ひずみの特性が解明されてきた（図2.1）。球頭ポンチ張出し（灰矢印）、液圧バルジ張出し試験（白抜き矢印）および単軸引張試験（黒矢印）におけるひずみ分布^{13),14)}を示す。横軸は引張方向ひずみ、縦軸は圧縮方向ひずみであり、予ひずみ付与前のひずみ分布を0としてこれを原点に取る。矢印の始点は予ひずみ付与後のひずみの座標（ ε_{pL} , ε_{pW} ）、矢印の終点は形状回復後のひずみの座標（ ε_{rL} , ε_{rW} ）、矢印は始点から終点に向かって結んでおり、形状回復方向と形状回復ひずみの大きさを表す。予ひずみ比 β を以下の式(2.1)で定義する。

$$\beta = \varepsilon_{pW} / \varepsilon_{pL} \quad (2.1)$$

各試験の予ひずみ付与工程と予ひずみ比 β は以下の通りである。球頭ポンチ張出しはポンチストロークにより予ひずみを調整、また試験片の板幅を変化させることで平面ひずみとその付近の領域 $-0.5 < \beta \leq 0$ を調査した。液圧バルジ張出しは、ダイス形状を正円 $\phi 150\text{mm}$ や、長径 \times 短径が $150\text{mm} \times 120\text{mm}$, $150\text{mm} \times 100\text{mm}$, $150\text{mm} \times 75\text{mm}$ の楕円の計4通り用意し、さらに液圧（2～16MPa）を変えることで試験片に引張-引張の2軸応力によるひずみの領域 $0.44 \leq \beta \leq 1.09$ を調査した。単軸引張は引張試験片に引張荷重を加え、 $\beta = -0.5$ の領域を調査した。

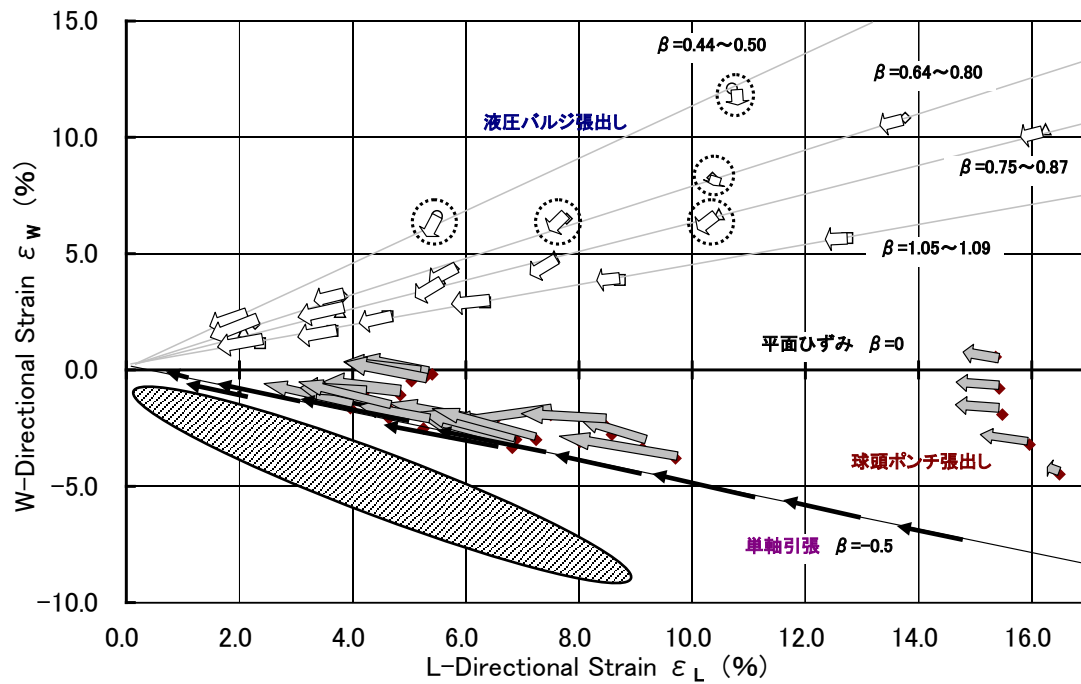


図 2.1 平面応力の予ひずみに対する形状回復ひずみの特性

本実験では斜線の領域を調査すべく, 引張-圧縮の 2 軸応力により付与されたひずみとその形状回復ひずみ特性を研究し, これまで調査された単軸引張や等 2 軸引張の結果と統合することにより平面応力領域に対する形状記憶特性の解明に努める.

2. 2 試験方法

供試材は Fe-28%Mn-6%Si-5%Cr (mass%) の鉄系形状記憶合金を用いた. 本実験ではあらかじめ 1150°C の形状記憶処理を施した後, 板厚 0.84mm の薄板加工されたものを使用した. 薄板から直径 120mm の円盤を切り出し, 試験片とする. 図 2.2 に示すように試験片に深絞り加工を施す. しわ押えとダイスに固定されているフランジ部を本実験の測定部とする. フランジ部は半径方向に引張, 周方向に圧縮の応力状態であり, この 2 軸応力による予ひずみに対する形状回復ひずみを調査する. フランジ部にはしわの発生を抑制するためしわ押さえ圧力が作用しており, 測定部が 2 軸応力より複雑な応力状態になってしまう可能性がある. しかし一方で, しわ押さえによる圧縮応力は約 1MPa 前後であり, 半径方向と周方向の応力に比べて小さい値であることから, 無視できるとも考えられる. そこでしわ押さえ圧力が測定部に作用しないように, 図 2.2 の (a) 保護プレート使用の場合と, (b) 保護プレート不使用の場合の 2 種類の試験を行い, 比較する. 試験速度は全て 10mm/min で行った. 平頭ポンチはポンチ直径 40mm, 肩部 R=8mm, ダイス肩部 R=8mm である.

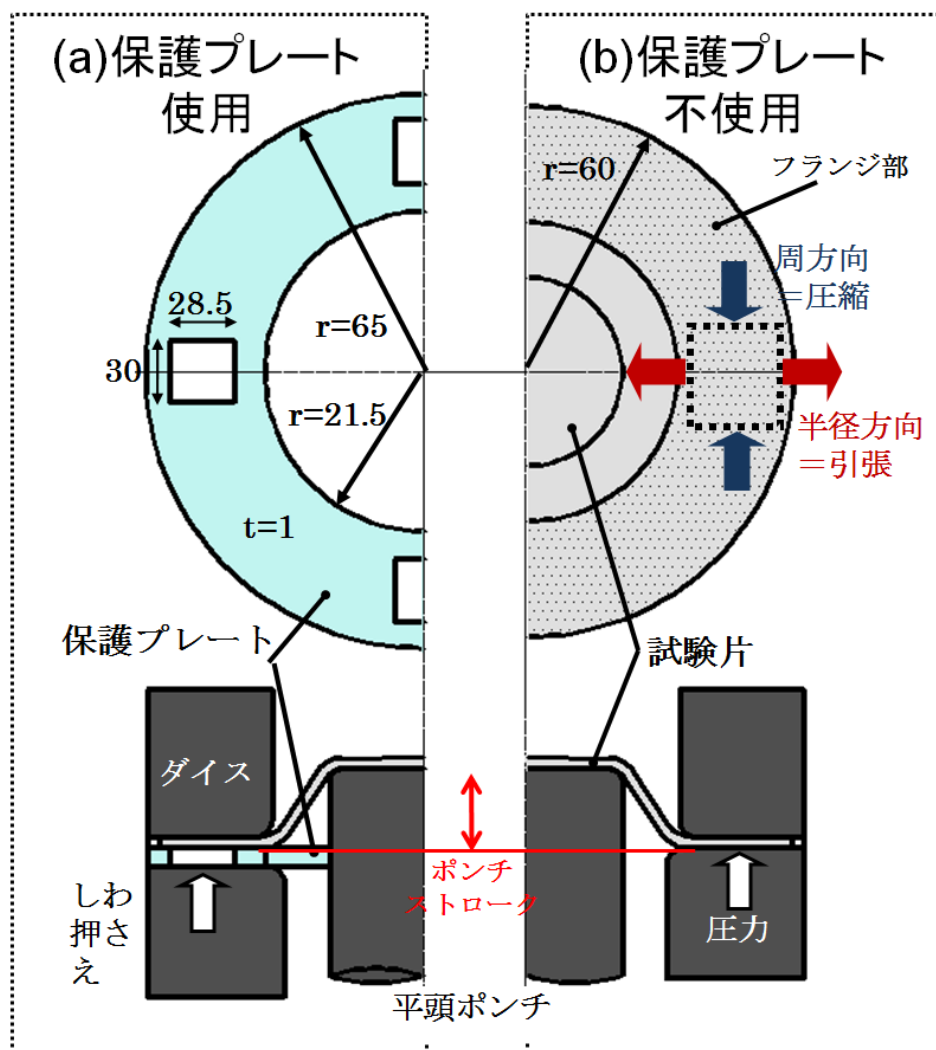


図 2.2 深絞り試験の概要

試験条件は表 2.1 であり, 試験片 a1~a6 は保護プレート使用の場合, 試験片 b1~b7 は不使用の場合である. a1~a6 は保護プレートによって測定部にしわ押さえ圧力がかからないため, 0MPa とする. 一方 b1~b7 は測定部に 0.90~1.22MPa のしわ押さえ圧力が作用している. フランジ部の予ひずみを変化させるために, ポンチストロークを変化させる. ポンチストロークは試験片がフラットの状態から, 深絞り加工終了までに動いた平頭ポンチの距離である. 各試験片のポンチストロークは破断した数値を基準に間隔をあけて設定し, 5mm~19.2mm とした. 測定部の最大予ひずみは半径方向で 0.8%~8.6%, 周方向で-0.5%~-8.9%の範囲を得ることができた.

表 2.1 試験条件と測定部の最大予ひずみ

試験片 番号	保護 プレート	測定部に作用する しわ押さえ圧力(MPa)	ポンチスト ローク(mm)	最大ひずみ 半径/周 (%)
a1	有り	0	9	1.2/-1.5
a2			11	2.8/-2.9
a3			13	4.6/-4.5
a4			15	6.0/-6.0
a5			17	7.9/-7.8
a6			19.2(破断)	8.6/-8.9
b1	無し	0.90	5	0.8/-0.5
b2		0.91	7	1.4/-1.3
b3		1.05	10	2.3/-2.5
b4		1.22	11	6.8/-6.4
b5		1.18	13	4.2/-4.0
b6		0.97	15	5.8/-5.9
b7		1.08	16.5(破断)	6.4/-5.5

予ひずみ, 形状回復ひずみの測定は以下の方法より求める. 試験片全体に 5×5mm のスクラブドサークルをつけた後, フランジ部の測定部に限り, 5mm 間隔の格子状の交点にビッカース硬さ試験機による直径 0.1mm 程度の圧痕を付け, これを標点間距離とする. 評点間の測定には 3 次元の寸法測定が可能な測定用光学顕微鏡を用いた. 深絞り加工前の状態と, 図 2.3 のように加工後に測定部のみを切り出した状態でそれぞれ評点間距離を測定し, 測定値を平均して予ひずみ ε_p を求めた. 変形前の評点間距離が L_1 , 変形後の評点間距離を L_2 のとき, 半径方向予ひずみ ε_{pL} と周方向予ひずみ ε_{pW} を以下の式で定義する.

$$\varepsilon_{pL} = \ln(L_{2L}/L_{1L}) \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{pW} = \ln(L_{2W}/L_{1W}) \quad (2.3)$$

形状回復処理として 390℃で 15 分間電気炉で加熱後, 空冷を施した. 形状回復後に再び評点間距離を測定し, 測定値を平均して形状回復ひずみ ε_r を求めた. 形状回復処理後の標点間距離が L_3 のとき, 形状回復ひずみの半径方向回復ひずみ ε_{rL} と周方向回復ひずみ ε_{rW} を以下の式で定義する.

$$\varepsilon_{rL} = \ln(L_{3L}/L_{2L}) \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{rW} = \ln(L_{3W}/L_{2W}) \quad (2.5)$$

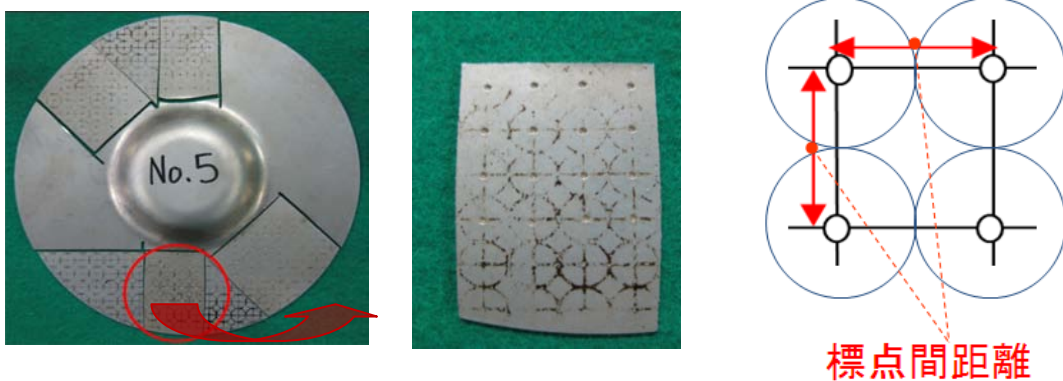


図 2.3 深絞り加工後の試験片全体と測定部

2. 3 試験結果及び考察

2. 3. 1 平面応力による予ひずみと形状回復ひずみの分布

試験片 b1~b7 の測定部から求められたデータを、これまで研究されてきた各試験と比較したものが図 2.4 である。深絞り試験のひずみ分布は緑矢印で示す。深絞り試験のフランジ部は、引張ひずみ：圧縮ひずみが 1：-1 である予ひずみ比 $\beta = -1.0$ 付近に集中している。このことから引張-圧縮の 2 軸応力がおおよそ再現できていたと言える。原点付近は $\beta = -1.5$, -2.0 になっているものや、矢印が原点方向に向いていないものもあるが、これはひずみが小さいため測定時の誤差があると考えられる。形状回復ひずみの大きさを表す矢印の長さを比較すると引張-圧縮 $\beta = -1.0$ の矢印は平面ひずみ $\beta = 0$ 付近の矢印の長さと同程度であり、単軸引張 $\beta = -0.5$ の矢印よりも短い傾向がある。よって形状回復ひずみは単軸応力による予ひずみ付与の時最大であり、2 軸応力状態による予ひずみ付与では単軸以上の形状回復特性は望めない。

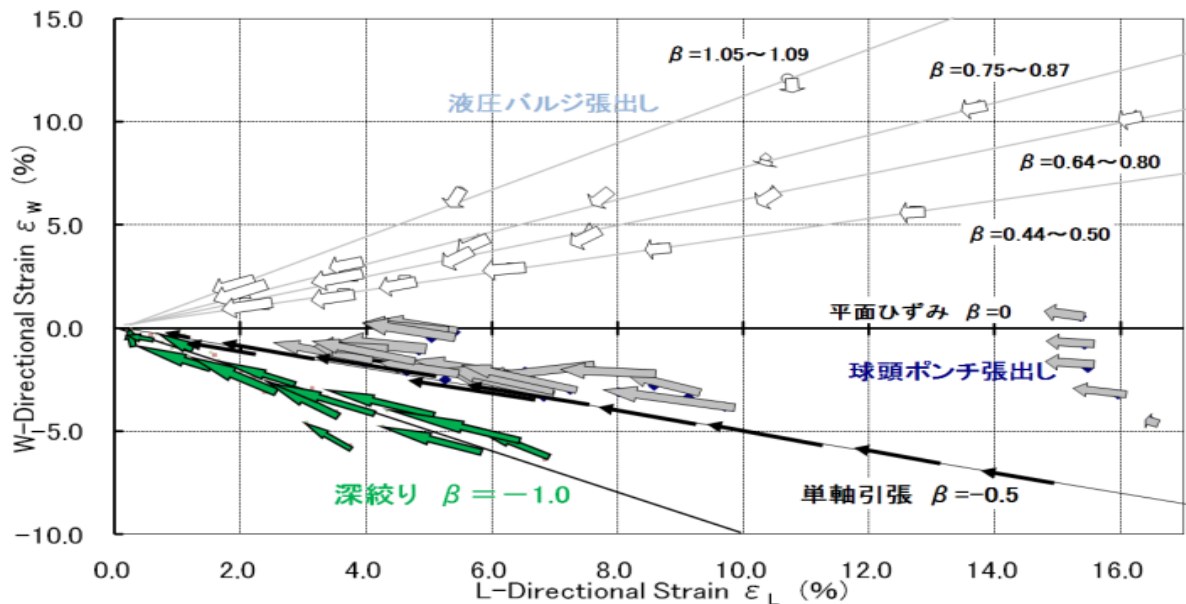
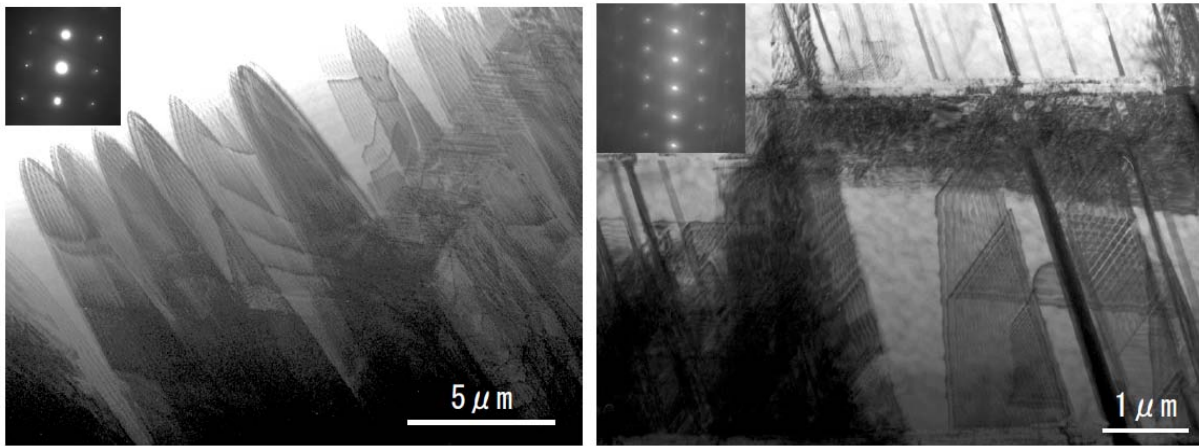


図 2.4 平面応力による予ひずみ付与後と形状回復処理後の引張方向と圧縮方向のひずみ分布

2. 3. 2 引張-圧縮の 2 軸応力によるひずみの形状回復後の電子顕微鏡観察組織

図 2.4 より引張-圧縮の 2 軸応力による予ひずみに対する形状回復ひずみは単軸引張のそれよりも特性が劣ることがわかった. そこで試験片 b4 の測定部を超高電圧電子顕微鏡 (HVEM) を使用して組織観察することでその原因を考察する. 測定部は平頭ポンチから近い部位と遠い部位で予ひずみが異なっており, 近ければ近いほど大ひずみが付与される. 図 2.5 は電子顕微鏡による測定部の a) 小ひずみ部位と, b) 大ひずみ部位の形状回復処理後のマイクロ組織写真である. 写真は引張応力軸がほぼ水平方向で圧縮応力軸が紙面に垂直である.

a) 小ひずみ部位は予ひずみ約 1% に対し形状回復ひずみは約 -0.5% であった. 予ひずみの 50% が回復し消失, 残留したひずみ 50% が写真のように存在したままである. b) 大ひずみ部位は予ひずみ約 6% に対し形状回復ひずみが約 -1.5%, したがって残留ひずみ 75% の状態である.



a) 小ひずみ部位

b) 大ひずみ部位

図 2.5 引張-圧縮の 2 軸応力によるひずみの形状回復後の電子顕微鏡観察組織

a) 小ひずみ部位は引張-圧縮の 2 軸応力で ϵ 相が応力誘起される方位に同一に導入されているが, 本合金は多結晶である為周囲の結晶粒に拘束され, 完全な回復は得られていない. b) 大ひずみ部位は複数の ϵ 相と, ϵ 相に変態できずに発生したすべり帯が互いに交錯している. 逆変態による形状回復挙動が交錯により阻害されるために形状回復特性が低下するものと考えられる^{15), 16)}. 多結晶の場合は単軸応力よりも 2 軸応力のほうがより複雑な交錯を起こしやすいのではないかと推測する.

2. 3. 3 平面応力の引張方向における形状回復ひずみ特性

深絞り試験の(a) 保護プレート使用の場合, (b) 保護プレート不使用の場合の 2 種類によりそれぞれ求められた予ひずみと形状回復ひずみを引張方向のみのデータでまとめ, 過去の試験と比較したグラフが図 2.6 である. グラフより (b) の試験片の方が (a) より形状回復特性が良好である. (a) の場合の深絞り加工後の試験片全体と測定部写真が図 2.7 であり, 測定部に曲げ変形が加わっている様子がわかる. 測定部がしわ押え圧力により保護プレートとダイスの空間に押し出されたためである. 一方, (b) 保護プレート不使用の場合は曲げ変形することはなかったため, (a) の形状回復特性劣化の原因は曲げ変形による予ひずみの複雑化であると考える.

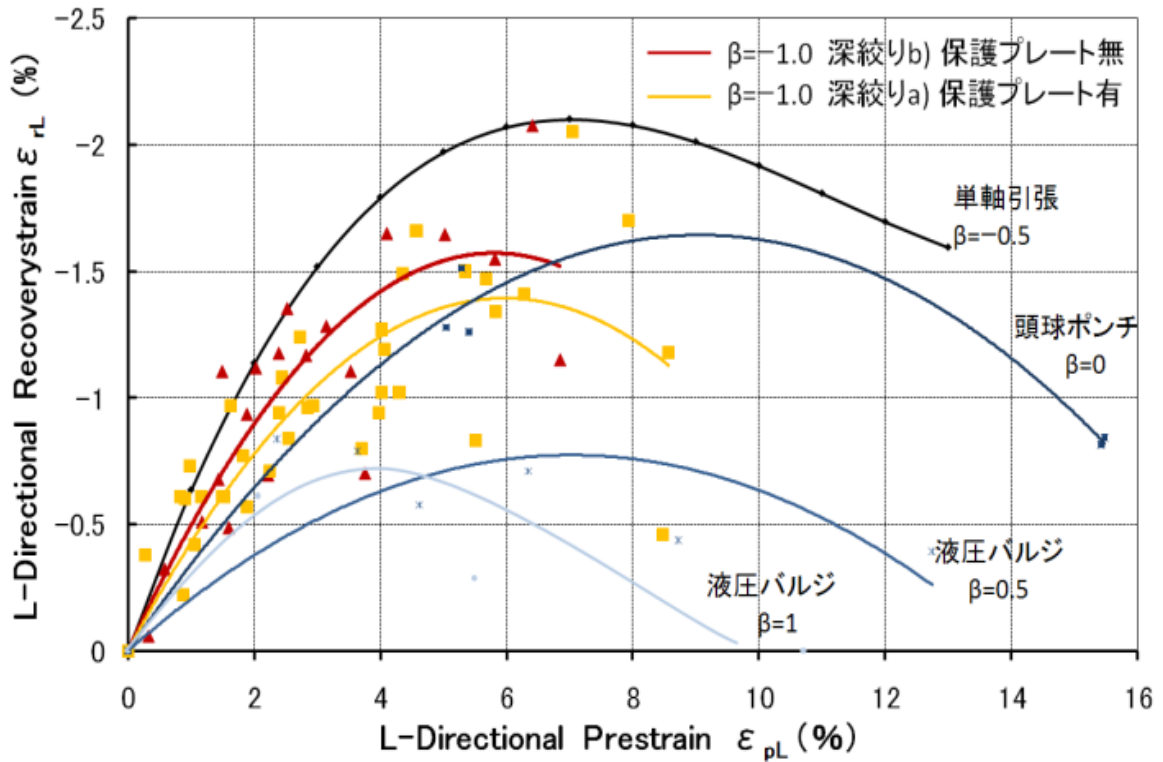


図 2.6 平面応力の引張方向ひずみとその形状回復ひずみ

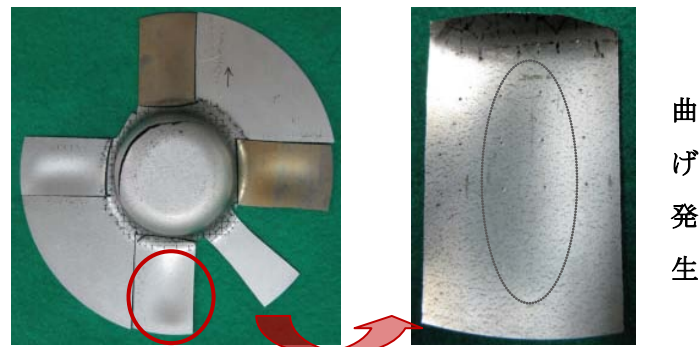


図 2.7 保護プレートを使用して深絞り加工をした場合の試験片全体と測定部

また (a) (b) どちらの試験結果も予ひずみ 6%以上の領域に対する回復ひずみはデータのばらつきが大きい。この領域は測定部の中で平頭ポンチに近い部位であり、大ひずみが付与される範囲にあたる。そのため板厚方向の薄肉化やビッカース硬さ試験機による圧痕の影響が他の部位より大きく、誤差が生じやすい。

次に単軸引張との比較をする。 $\beta = -0.5$ では、 ε_{pl} が増加するにつれ ε_{rl} の絶対値が増加し、概ね 7%の時に形状回復ひずみが最大となる。これに対し $\beta = -1.0$ では予ひずみ 6%のとき回復ひずみが最大となり、単軸引張よりも早い段階でピークを迎えている。

3. トレーニング処理材の形状回復応力特性の研究

3.1 緒言

単軸引張による予ひずみ付与を施した試験片が、形状回復処理の途中に拘束をすることで発生する形状回復応力を調査した。予ひずみ付与の際にトレーニング処理を施したものをトレーニング処理材と呼ぶ。

予ひずみ付与工程と形状回復処理工程を数サイクル施すことで、形状回復特性が向上することが知られている。これをトレーニング効果と称し、1 サイクル目の予ひずみ付与と形状回復処理工程をトレーニング処理とする。図 3.1 にはトレーニング処理の有無が形状回復ひずみに及ぼす影響について、図 3.2 にはトレーニング回数と加熱温度の影響¹⁷⁾について示す。形状回復率は以下の式で定義される。

$$\eta = -(\varepsilon_r / \varepsilon_p) \times 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

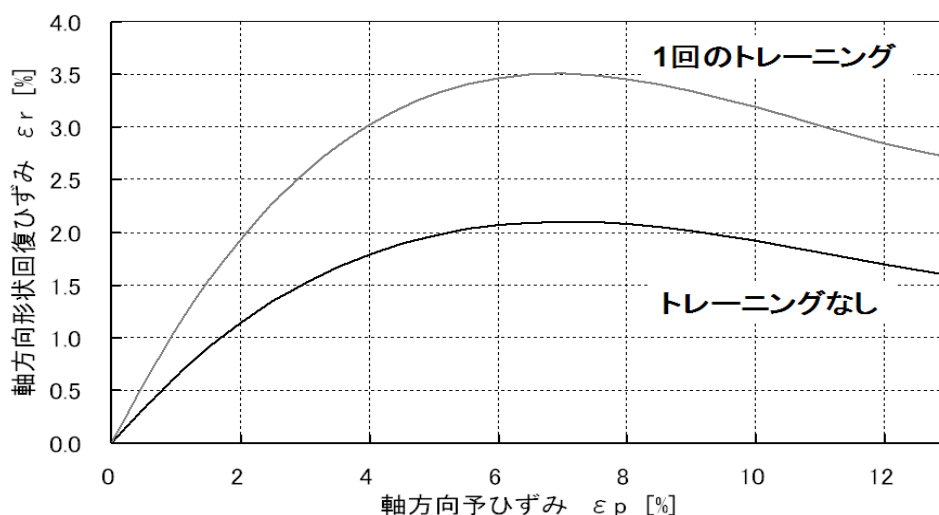


図 3.1 トレーニング処理の有無が形状回復ひずみに及ぼす影響

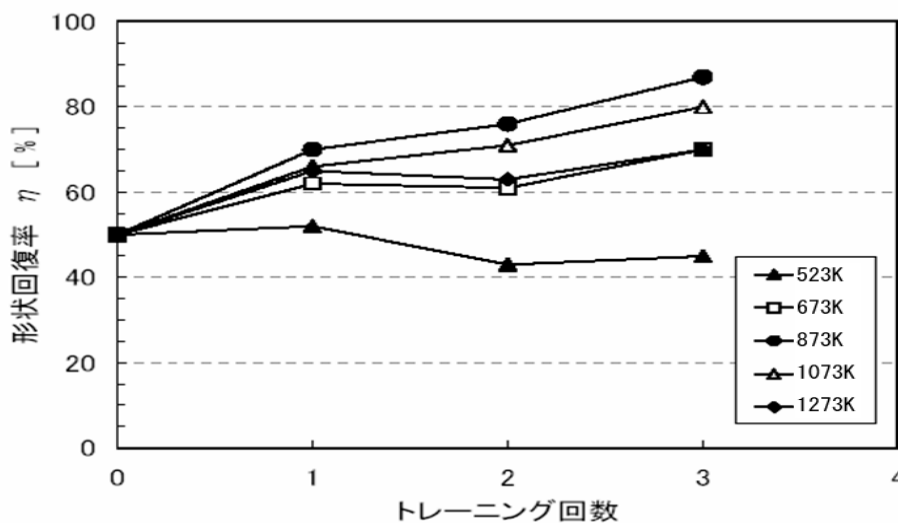


図 3.2 トレーニング回数とトレーニング処理の加熱温度が形状回復率に及ぼす影響¹⁷⁾

このようにトレーニング効果により形状回復ひずみが向上することは解明されているが、形状回復応力との関係は研究が不十分である。本研究ではトレーニング効果と形状回復応力との関係を考察する。

3. 2 試験方法

同合金薄板から切削加工により図 3.3 に示す平行部が 100mm, 幅が 20mm の引張試験片を切り出す。トレーニング無し試験片はインストロン型万能試験機にて予ひずみ 6%付与後、形状回復応力試験に移る。予ひずみ付与前の平行部長さを L_1 , 予ひずみ付与後を L_2 , 試験後を L_3 とし, 予ひずみ ε_{pL} は(2.2)式, 回復ひずみ ε_{rL} は(2.4)式を用いて算出する。

トレーニング有り試験片は予ひずみ 6%付与後に加熱温度 600℃で形状回復処理をする工程をはさみ, 再度予ひずみ 6%付与後, 形状回復応力の測定に移る。こちらは 600℃の形状回復処理後の平行部長さを L_1 , 予ひずみ再付与後を L_2 , 試験後を L_3 とし, (2.2)式と(2.4)式を用いて算出する。

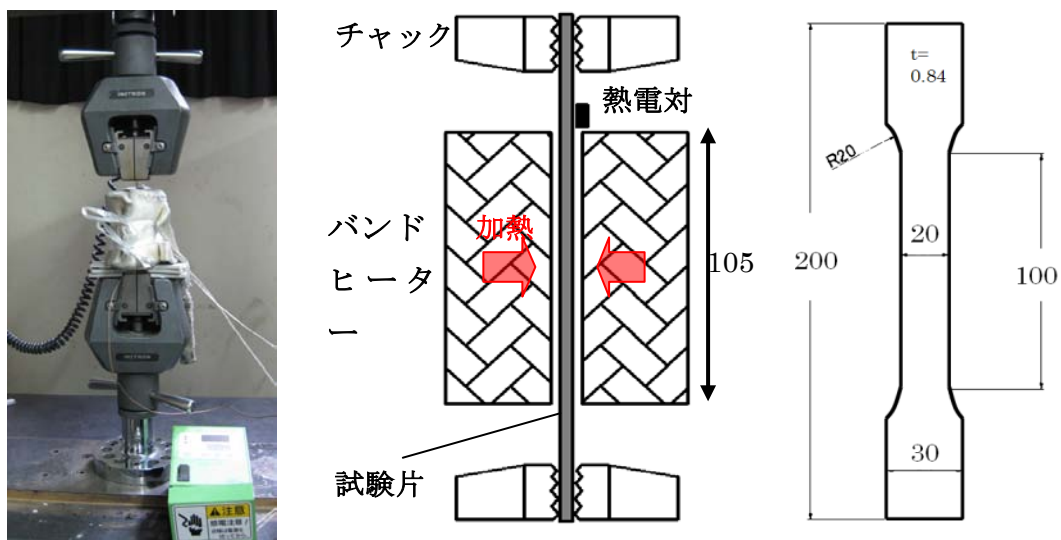


図 3.3 形状回復応力試験の概要

形状回復応力試験は図 3.3 のように予ひずみ付与された試験片をインストロン型万能試験機のチャックに固定する。次に形状回復時の試験片温度の経過観察のため, バンドヒーター内部に触れない試験片上部に熱電対を取り付ける。最後にバンドヒーターを取り付け, 試験片温度が 350℃~360℃になるまで加熱, その後冷却することで形状回復処理を施すことができる。万能試験機のロードセルの変位より形状回復ひずみ ε_{rL} を, 軸方向荷重より試験片に発生した形状回復応力 σ を算出する。

図 3.4 は予ひずみ付与された鉄系形状記憶合金が、熱処理によって形状回復ひずみを発現していく過程を簡略に示したグラフである。原点から加熱により熱膨張を開始,その後形状回復効果によりひずみは減少し始める。形状回復が終了すると原点と同じ温度まで冷却することで熱膨張がなくなり形状回復ひずみを得る。形状回復を拘束開始するタイミングは図 3.4、表 3.1 のようにA点からH点まで設定する。拘束を開始するまでに回復したひずみを消費形状回復ひずみ ε_{rD} , 拘束後の応力発生に寄与するひずみを有効回復ひずみ ε_{rE} と称することにする。

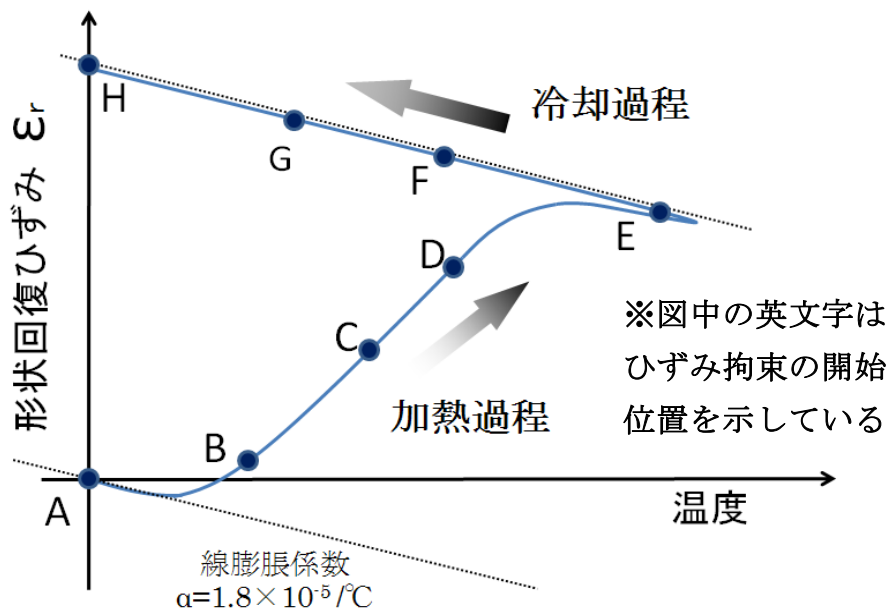


図 3.4 加熱冷却温度と形状回復ひずみの推移

表 3.1 A点からH点までの消費形状回復ひずみと有効形状回復ひずみ

拘束 条件 番号	消費 形状回復 ひずみ (%)	有効 形状回復 ひずみ (%)
A	0	1.95
B	0.14	1.81
C	0.55	1.40
D	0.81	1.14
E	0.98	0.97
F	1.27	0.68
G	1.46	0.49
H	1.95	0

3. 3 試験結果及び考察

3. 3. 1 トレーニング処理材の消費回復ひずみと形状回復応力

トレーニング処理材の途中拘束B点～G点で発生する形状回復応力 σ の推移を示したグラフが図 3.5 である. 各点の消費形状回復ひずみ ε_{ru} は以下の通りである.

B点 : $\varepsilon_{ru} = 0.14\%$ C点 : $\varepsilon_{ru} = 0.55\%$

D点 : $\varepsilon_{ru} = 0.81\%$ F点 : $\varepsilon_{ru} = 1.27\%$

G点 : $\varepsilon_{ru} = 1.46\%$

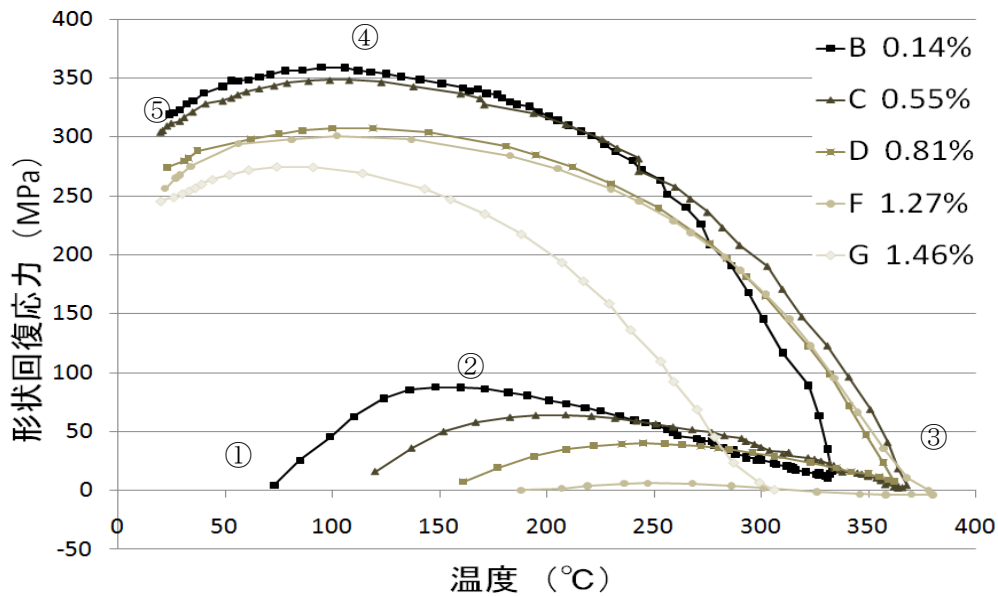


図 3.5 トレーニング処理材の消費回復ひずみの変化による形状回復応力の推移

グラフの推移は①～⑤の領域で変化を示す. ε 相 \rightarrow γ 相への逆変態により縮み変形して引張応力を生じ(領域①-②), 形状回復が終了すると熱膨張による引張応力の緩和が起こる(領域②-③). 冷却過程では初めのうち熱収縮による発生応力は増加傾向となるが(領域③-④), 100°C近傍から形状回復応力は低下している(領域④-⑤). 領域④-⑤では形状回復応力により再度予ひずみ付与工程に入り $\gamma \rightarrow \varepsilon$ 相変態が生じるため, それに伴うひずみ変化により応力緩和現象が生じていると考える.

3. 3. 2 試験片平行部の温度の偏り

測定後の試験片の写真が図 3.6 であるが、平行部中央は過剰に加熱されており変色しているのがわかる。平行部中心の温度を測定してみたところ、熱電対貼り付け位置との温度差は 150~200℃であった。このため加熱による膨張と形状回復の進捗が中央と端部では異なる。図 3.5 の横軸が平行部中央の温度であれば領域③は約 500℃となり、領域②-③と領域③-④の曲線の傾きは緩やかになるはずである。



図 3.6 形状回復応力測定試験後の試験片

3. 3. 3 トレーニング処理の有無と形状回復応力の関係

消費形状回復ひずみ ϵ_{ru} と冷却後の形状回復応力 σ の関係を図 3.7 に示す。グラフはトレーニング処理によって形状回復特性は向上することを表し、H 点で形状回復ひずみが約 16%、A 点で形状回復応力が約 20% 向上した。

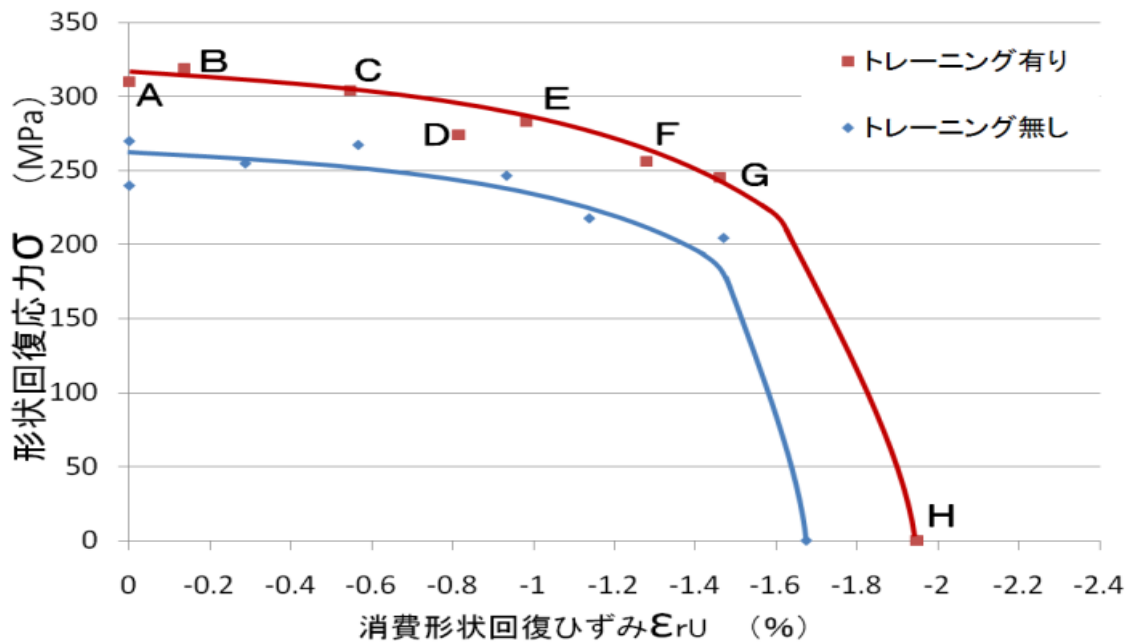


図 3.7 形状回復応力-消費形状回復ひずみ線図

次に消費形状回復ひずみ $\varepsilon_{ru} = 1.95\%$ のH点を原点とし, 有効形状回復ひずみを横軸としたグラフが図 3.8 である. 応力 σ はF値とn値を用いると (3.2) 式で表せる.

$$\sigma = F \cdot \varepsilon^n \quad (3.2)$$

(3.2) 式より図 3.8 のトレーニング有りの形状回復応力-有効形状回復ひずみ線図は(3.3)式, トレーニング無しの形状回復応力-有効形状回復ひずみ線図は(3.4)式で表す.

$$\sigma = 274 \cdot \varepsilon^{0.262} \quad (3.3)$$

$$\sigma = 246 \cdot \varepsilon^{0.180} \quad (3.4)$$

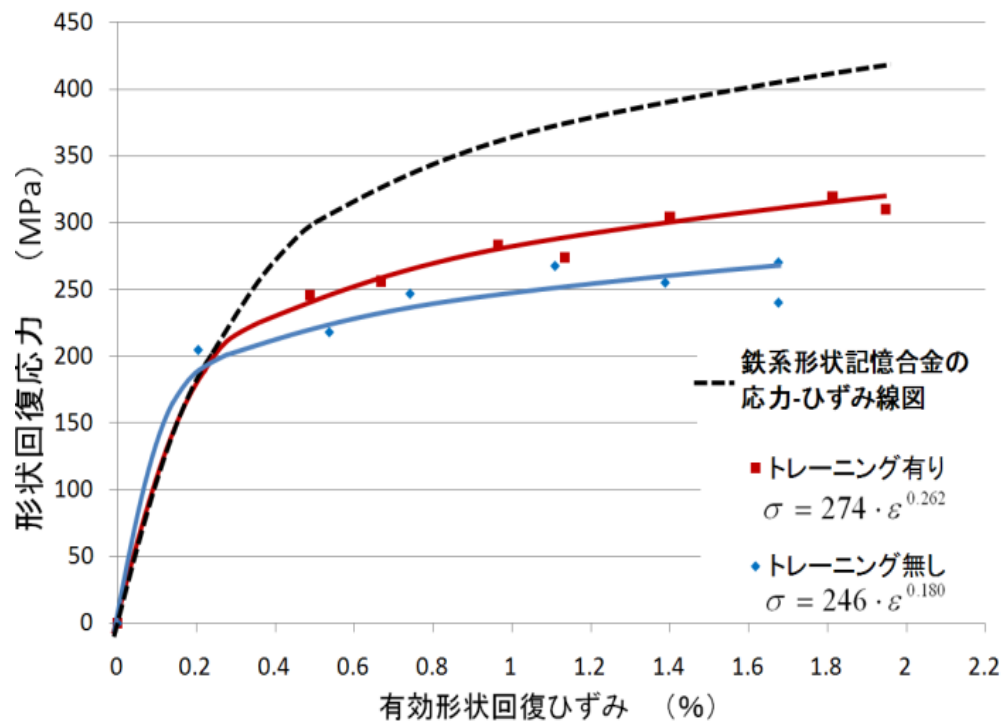


図 3.8 形状回復応力-有効形状回復ひずみ線図と鉄系形状記憶合金の応力-ひずみ線図

同合金の常温での引張試験で求められた応力-ひずみ線図¹⁸⁾と比較する. 有効形状回復ひずみ $\varepsilon_{re} = 0.2\%$ 未満の弾性域においては 3 曲線がほぼ一致している. このことから形状回復ひずみによる収縮で発生する形状回復応力は, 引張試験で与えられた引張ひずみに対する応力と同程度である. つまり予ひずみが 100%形状回復する試験片を完全に拘束した場合に発生

する応力は, 予ひずみ付与時に試験片に発生した応力と一致することが考えられる. $\varepsilon_{rE}=0.5\%$ 以上になると 3 曲線に差が表れてくる. 引張試験の場合のひずみ ε は引張荷重による変形であるが, 形状回復ひずみ ε_r は, 熱ひずみ $\varepsilon_{\text{thermal}}$ と, $\gamma \rightarrow \varepsilon$ 相変態および $\varepsilon \rightarrow \gamma$ 相変態による相変態ひずみ $\varepsilon_{\text{transformation}}$ の複合的な値であり, 以下の (3.5) 式により定義できる.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{\text{thermal}} - \varepsilon_{\text{transformation}} \quad (3.5)$$

形状回復応力-有効形状回復ひずみ線図が応力-ひずみ線図と誤差が生じる原因としては, 平行部の過剰な加熱に伴う熱ひずみ $\varepsilon_{\text{thermal}}$ 増加の影響や, 図 3.5 の領域④-⑤で起こる応力緩和の影響ではないかと考察する.

4 鉄系形状記憶合金の継手への適用試験

4. 1 緒言

4. 1. 1 無電柱化推進計画と電力埋設管

日本における電線類の地中化は、1986年度に策定した「電線類地中化計画」から始まる¹⁹⁾。1998年度まで3期の計画を策定して、主に大規模な商業地域の整備をすすめ、約3400kmを達成。その後、1999年度から「新電線類地中化計画」に基づき地中化を進め、2003年度末には約5500kmを整備した。今後は2004年度からスタートした「無電柱化推進計画²⁰⁾」に基づき、これまでの幹線道路に加え、主要な非幹線道路も対象に無電柱化をさらに推進していくと、国土交通省と関係省庁、関係事業者が取りまとめている。

無電柱化のメリットとして以下のことがあげられる。(図4.1参照)

(1) 安全で快適な歩行空間の確保

電柱をなくすと同時に歩道整備も行われることで、車椅子利用者などにとって使いやすいバリアフリーの歩行空間が形成されると共に、道路の見通しが良好になり、安全性が向上する。また、道路に沿って立つ電柱は車両の衝突による重大事故の要因ともなっており、無電柱化はそのような事故の要因を取り除くためにも有効といえる。

(2) 都市景観の向上

京都や奈良など歴史的な街並みを保存しようとする運動は日本各地で行われている。また、オフィス街や住宅地でも景観に配慮した都市計画が進行している。その計画の1つとして地上に張りめぐらされた電線類が道路の下に収められることで、美しい街並みが形成される。

(3) 都市災害の防止

災害時における、電柱の倒壊や電線の破断による感電、火災等二次災害を防ぐと共に、消防および救命活動の空間の確保を可能とする。

(4) 情報通信ネットワークの信頼性の向上

災害時における電線の破断被害を軽減することが可能になり、災害時の情報通信ネットワークを確保し、情報の信頼性を向上させることが可能となる。



Before

After

図 4.1 無電柱化の施工前後

無電柱化に伴い、電気や通信等の複数のケーブルを通す管路を歩道下などの地下空間に共同で埋設する。この施設を電線共同溝と呼び、国土交通省による「電線共同溝の整備等に関する特別措置法」に基づいて施工されている。埋設された管路(地中埋設管)には所々にハンドホールと呼ばれるコンクリート製函型連結部が取り付けられており、その壁面から配線を分岐させるための接合管が取り付けられている。その接合管から、建物内に配管させる際に使用する電力・通信ケーブル用地中埋設管²¹⁾を本研究では電力埋設管²²⁾と呼び、震災や地殻変動による地盤沈下等に対応する機能を有する。電線共同溝を図 4.2 に、電力埋設管の施工例を図 4.3 に示す。

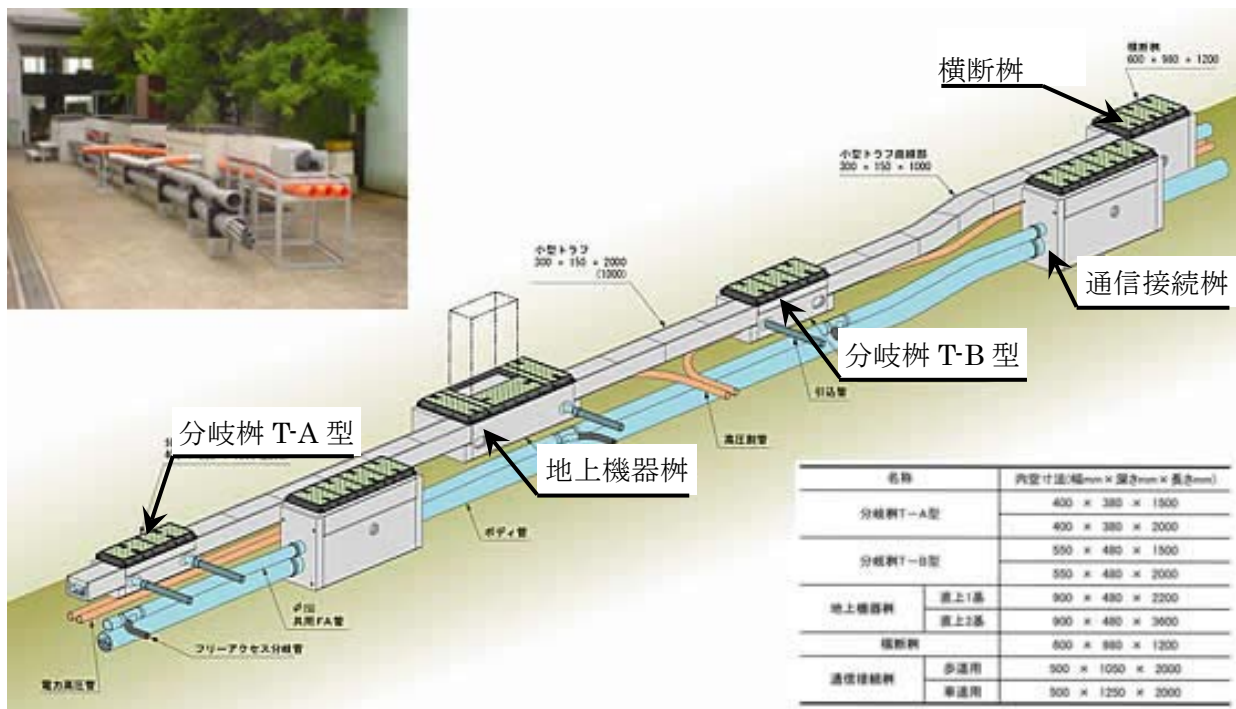


図 4.2 電線共同溝施工模式図²³⁾

- ・分岐樹 T-A 型；電力低圧分岐接続体および情報通信・放送系ケーブル等のタップオフを収容し需要家へ引込みを行う樹。
- ・分岐樹 T-B 型；電力高圧・低圧分岐接続体および情報通信・放送系ケーブル等のタップオフを収容し需要家へ引込みを行う樹。
- ・横断樹；支道横断部で小型トラフを管路部に変更する。
- ・地上機器樹；地上に設置する機器(電力変圧器等)に使用。
- ・通信接続樹；情報通信・放送系ケーブルの接続・分岐のためにクロージャーやタップオフ等を収容。

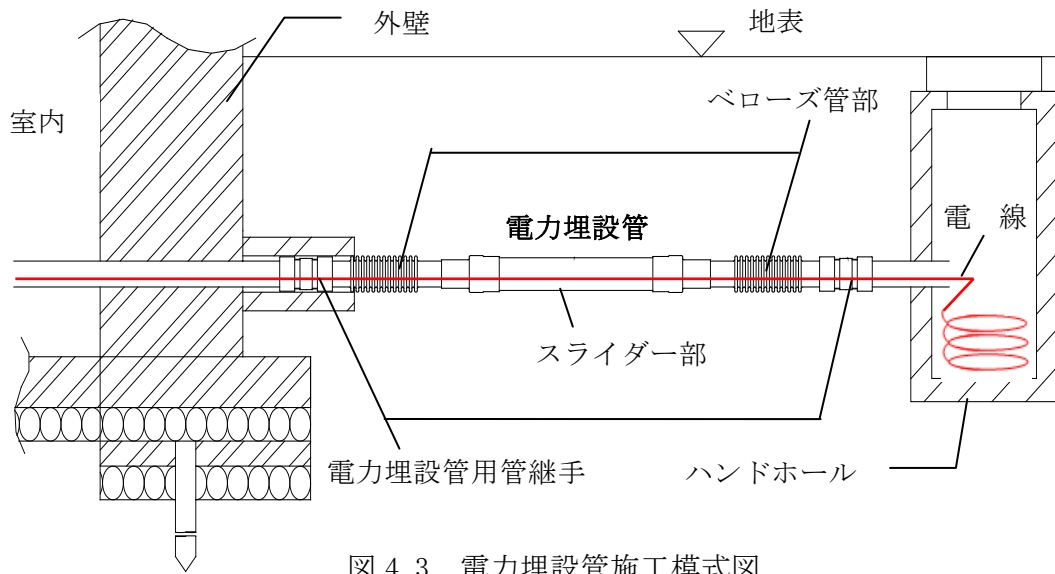


図 4.3 電力埋設管施工模式図

地盤沈下が起きると、埋設管には曲げの力や軸方向の引張りの力が加わり、埋設管が扁平、座屈、破断などを起こしてしまい、管内の電線やケーブルを保護することができなくなってしまふ。これを防ぐため、電力埋設管のベローズ管部は地盤沈下時における曲げに対して、スライダー部は伸びに対して、埋設管の地盤沈下時の断面形状を保持する仕組みになっている。この電力埋設管と建物およびハンドホールから伸びる鋼管とを接続しているのが電力埋設管用管継手である。電力埋設管の施工例を図 4.4 に示す。

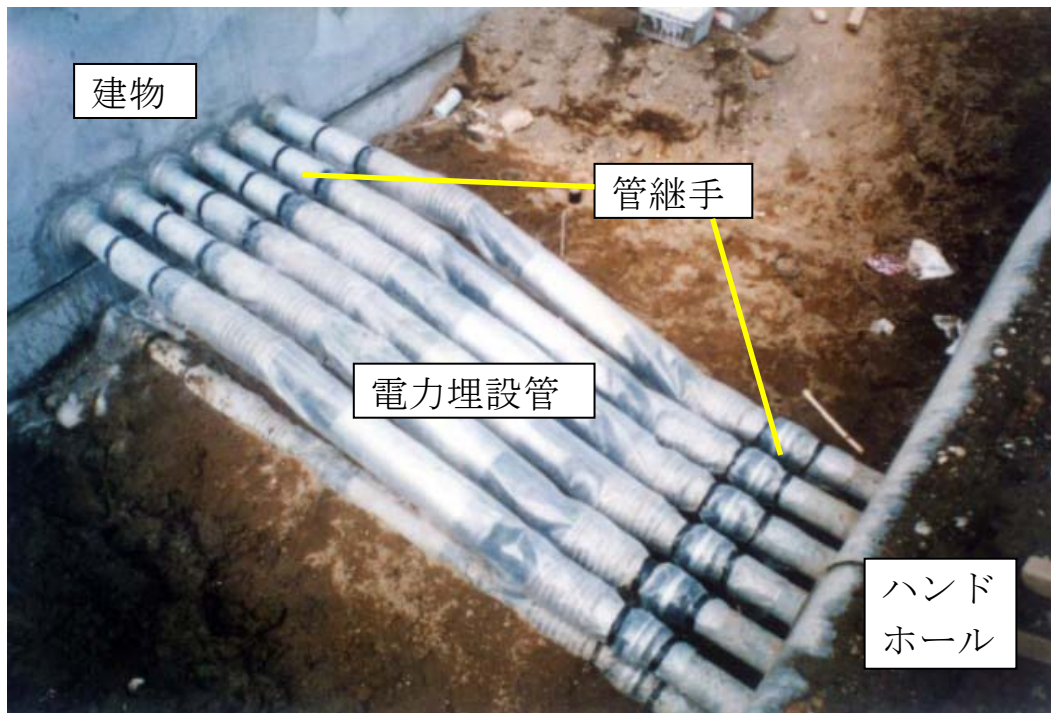


図 4.4 電力埋設管の施工例

4. 1. 2 電力埋設管用継手

通常建物から地中へケーブルを伸ばす配管や地中埋設管には炭素鋼鋼管 (SGP50A) が用いられるが、ベローズ管を有する電力埋設管にはステンレス鋼管 (SUS304) が用いられる。ここで本研究では締結される鋼管を母管と呼ぶ。SGP50A 母管と SUS304 母管の接続では異種金属接触による電気腐食が起こるため、接合部において両母管の電氣的接触を防ぐ必要がある。

現在は図に示すユニオン継手と呼ばれる継手を使用されているが、部品形状が複雑で使用部品数も多く、母管へのねじ切り加工や溶接が必要であるため作業性の悪さや高コストといった多くの問題点がある。これらの問題を解決するため、本研究では鉄系形状記憶合金を用いてよりシンプルで安価な新しい継手の開発を目指している。電力埋設管用継手として東京電力(株)殿仕様より以下の条件を満たすことが必要とされている。

(1) 継手からの母管引抜き時の強度 (以下、管継手強度と呼ぶ) が 14.7kN 以上 ²¹⁾

(2) 絶縁性能として電気抵抗値 1M Ω 以上 ²¹⁾

図 4.5 にユニオン継手組立図を、図 4.6 に鉄系形状記憶合金管継手組立図の一例を示す。

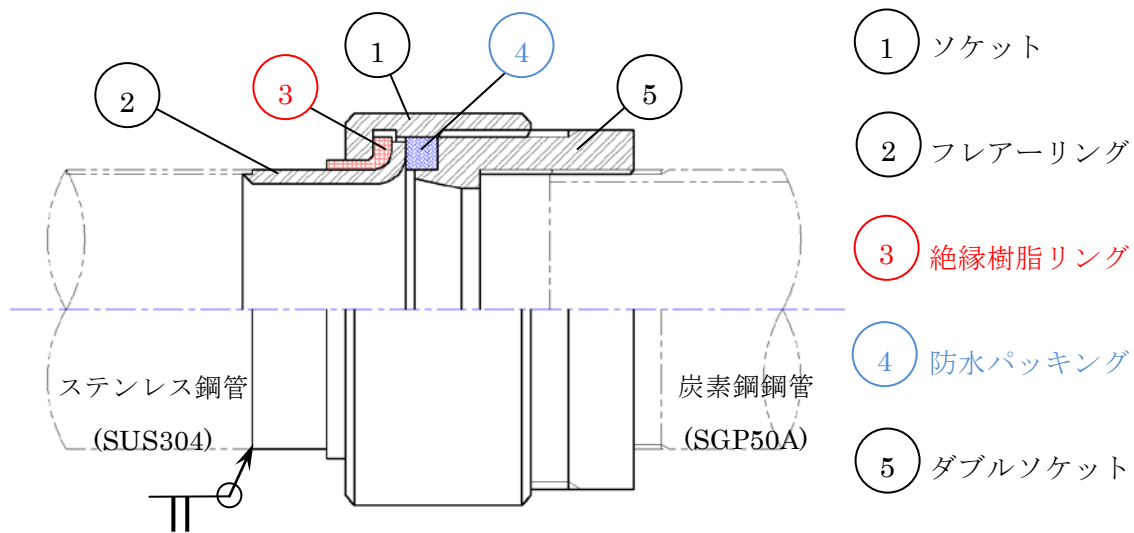


図 4.5 ユニオン継手組立図

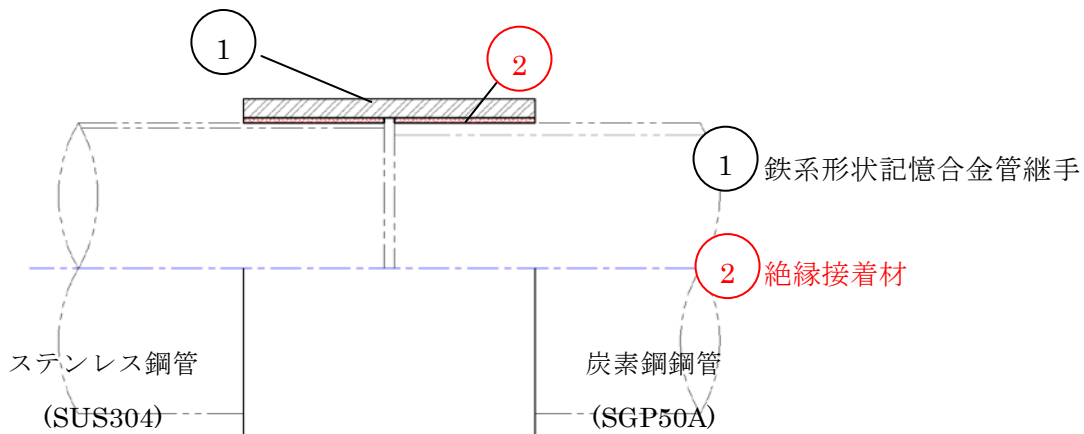


図 4.6 鉄系形状記憶合金管継手組立図

4. 2 試験方法

本研究では鉄系形状記憶合金の最適成分系として Fe-28Mn-6Si-5Cr (mass%) を用いた。供試材を溶解後、鍛造にて丸棒状に加工したのち、切削にて円管状に加工し、試験片端面の片側にだけ刻印を打つ。その後、1050℃で90分間の固溶化熱処理を施し、試験片に形状記憶処理を施した。本研究では予ひずみ付与工程として拡径を行い、形状回復処理を施すことで管を締結させる。拡径法は図4.7に示すように角度5°のテーパ付きマンドレルを押し込むことで拡径を行う押し込み加工を用いた。テーパ付きマンドレルを、インストロン型万能試験機を用いて6mm/minの押し込み速度で試験片の刻印が打ってある端面側から軸方向長さの半分まで押し込み、一度マンドレルを抜いたのち、試験片の逆端部から再度マンドレルの押し込みを同速度で行い、拡径の完了とした。この際、潤滑剤として二硫化モリブデンを用いた。また、一度拡径を行い、形状回復処理を施したのち再度拡径を行うことで、1サイクルのトレーニング処理を施すとした。第二拡径を行った後に試験片内外部の表面形状を切削加工にて整え、表4.1の寸法形状に仕上げる仕上げ加工を行い、試験片の完成とした。また、これまでの研究データに基づき、拡径ひずみは中心径周方向ひずみ6%とし、トレーニング時の形状回復処理は600℃にて30分間の熱処理を行い、管継手として母管を締結させる際の形状回復処理は350℃にて30分間の熱処理を行った。

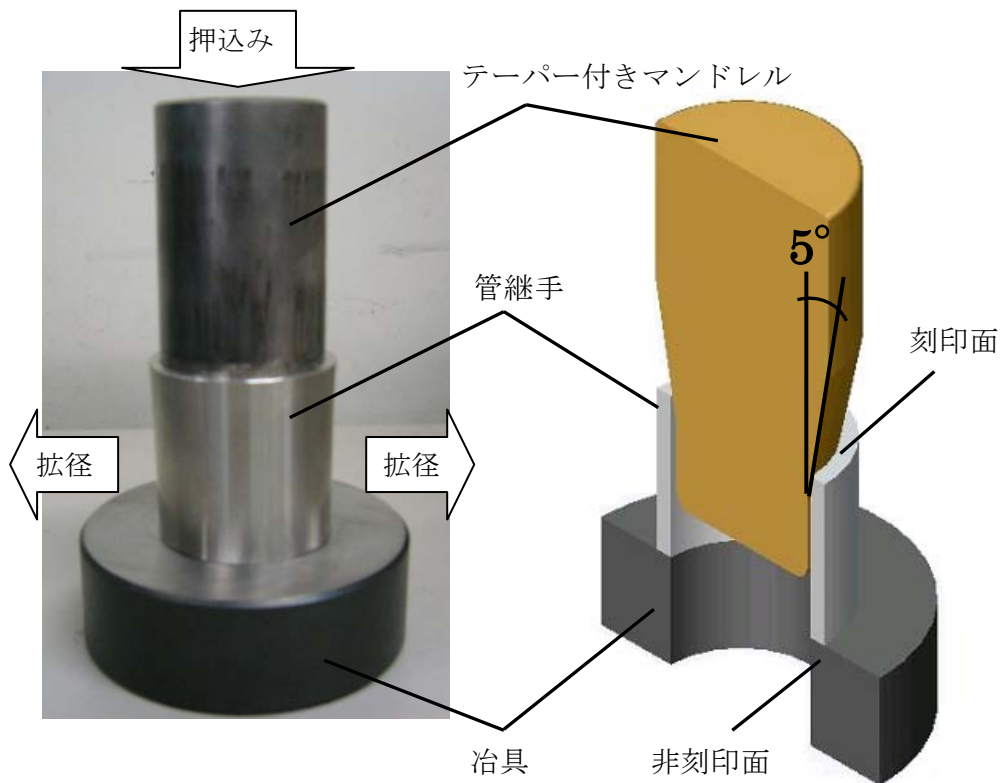


図 4.7 テーパー付きマンドレルによる押し込み

表 4.1 鉄系形状記憶合金継手の寸法 (mm)

番号	形状記憶合金継手寸法					母管外 径 Dm	間隙 クリアランス C
	外径 Do	内径 Di	長さ L	厚さ t	比 L/Da		
R1	67.10	61.10	60	3	0.94	60.5	0.60
R2	67.06	61.06	100		1.56		0.56
R3	67.18	61.18	100		1.56		0.68
R4	67.02	61.02	140		2.19		0.52
R5	69.04	61.04	60	4	0.92	60.5	0.54
R6	69.06	61.06	100		1.54		0.56
R7	69.22	61.22	100		1.53		0.72
R8	69.04	61.04	140		2.15		0.54
R9	71.09	61.11	60	5	0.91	60.5	0.61
R10	71.11	61.10	80		1.21		0.60
R11	71.12	61.09	100		1.51		0.59
R12	71.10	61.12	100		1.51	60.3	0.82
R13	71.11	61.10	120		1.82	60.5	0.60
R14	71.12	61.11	140		2.12		0.61
R15	71.14	61.08	140		2.12	60.3	0.78
R16	71.10	61.09	140		2.12	60.1	0.99

備考 : $Da=Do-(Do-Di)/2$, $C= Di-Dm$,

絶縁材長さ $Li=(L-4)/2=$ 接触距離 L'

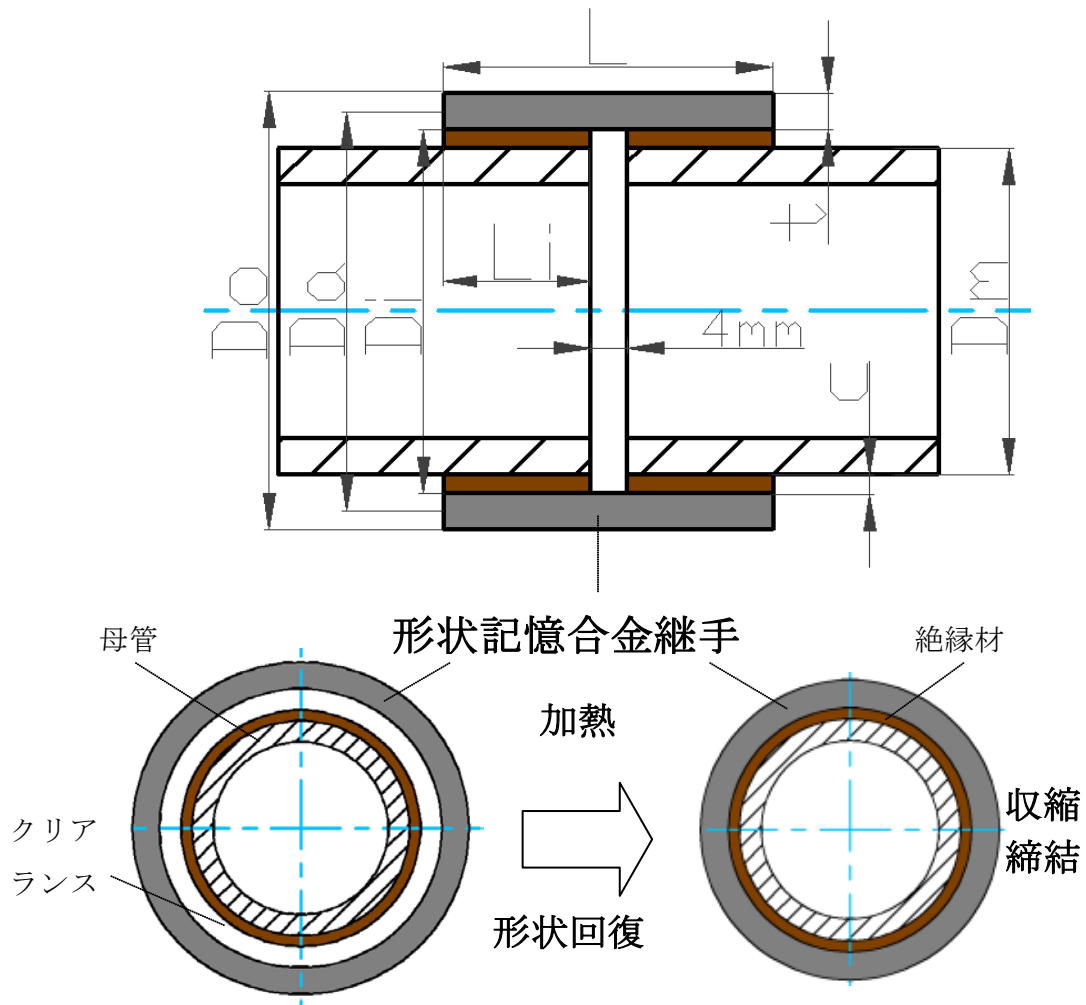


図 4.8 形状記憶特性を利用した継手の管締結法

締結する両母管を内部に通し、継手外部からバンドヒーターによる 350℃、30 分間の加熱で形状回復処理を施すことによって縮径させ、その際発現する形状回復応力を利用して母管を締結させる方法を用いる（図 4.8）。試験片と母管のクリアランス C には絶縁材を挟み込んでいる。これは鉄系形状記憶合金と炭素鋼管の異種金属接触による電気腐食の防止と、耐水圧向上を目的としている。

本研究では製作した継手に対して以下の 4 つの評価試験を行い、継手性能を確認する。

4. 2. 1 継手強度試験

継手強度とは、継手から母管の引抜きを行った際の母管が抜け落ちるまでの最大引張荷重とする。試験片 R1～R16 を図 4.8 のように母管と締結させる。母管の両端にはあらかじめねじを切っており、引張試験用チャックとねじ締結する。万能試験機を用いて 167N/sec の荷重増加率で引張試験を行った。継手強度は 14.7kN 以上が必要とされており、実験値と比較する。R11, 12 と R14～16 の継手については周方向にひずみゲージを取り付けており、取り付け位置は継手外表面の両端面から 5.0 mm の位置に 1 つずつ、中央に 1 つの計 3 つ、180° 対称にも同様に 3 つ、合計 6 箇所である（図 4.9）。



図 4.9 継手強度試験の様子

4. 2. 2 耐食性試験

継手が異種金属同士を繋ぐ際の電食を防止するため規定された $1M\Omega$ 以上の抵抗値²¹⁾を持つ絶縁材を母管に巻きつけ継手と母管のクリアランスCに挟み込む。また継手締結に必要な 350°C , 30 分間の形状回復処理に耐える特性も備えているものでなければならない。抵抗値の測定は継手締結後にテスターを使用して行う。R1~R16 の継手に使用した絶縁材は、厚さ 0.125mm ・耐熱温度 400°C のポリイミドフィルム (商品名:カプトン 500H²⁴⁾, 以下 PI), 厚さ 0.13mm ・耐熱温度 200°C のセラミック等の無機素材を主成分とした絶縁シート (商品名:タフクイン²⁵⁾, 以下 T), 片側コーティング絶縁シート (商品名:タフクイン TF²⁵⁾, 以下 TF), 積層絶縁シート (商品名:タフクイン TFT²⁵⁾, 以下 TFT) の 4 種である。また絶縁剤の貼り付け補助として耐熱温度 350°C の熱硬化性ポリイミド樹脂接着剤 (商品名:PI-32²⁶⁾, 以下 PIg) を使用する。各絶縁材の性能を図 4.10 に示す。



	PI	T	TF	TFT	PIg
成分特徴	ポリイミドフィルム	セラミック等の無機素材			熱硬化性ポリイミド樹脂接着剤
		タフクインのみ	タフクイン片側をPETフィルムで強化	タフクイン両側をPETフィルムで強化	
厚さ	0.125mm	0.13mm			
耐熱温度	400°C 、12時間	200°C 、長時間			350°C

図 4.10 各絶縁材の性能

4. 2. 3 耐水圧試験

埋設管は雨水などの浸水から管内のケーブル等を保護しなければならない。継手はボールジョイントの規格²¹⁾と同様の耐水圧性能が要求されており、締結後の試験片の内部に0.2MPaの水圧を5分間加えて継手部分より漏水の有無を目視で観察する(図4.11)。本試験では継手長さ $L=60\text{mm}$ 、肉厚 $t=5\text{mm}$ で統一、クリアランス $C=0.6\text{mm}$ 、 0.8mm 、 1.0mm の3種類用意して比較する。絶縁材はPIとPIgを使用した。



図 4.11 耐水圧試験の様子

4. 2. 4 地盤沈下シミュレーション試験

本試験は地中で起こる地盤沈下を空中で再現する。図 4.12, 図 4.13 のような鉄系形状記憶合金継手を用いた電力埋設管を 3.0mm/sec の沈下速度で 1000mm 沈下させ, 継手に異常がないかを観察する。使用する電力埋設管はベローズ管とスライダで構成されており, それぞれ曲げと伸縮に対して対応できるようになっている。継手は表 2 の試験片番号 R15 と同様のものを使用し, 絶縁材は PI と PIg を使用した。ひずみゲージを継手ひとつに対し 0° と 180° に 1 つずつ, 90° に 2 つの計 4 つ貼り, 基準を 90° として継手に働く軸力を測定した。

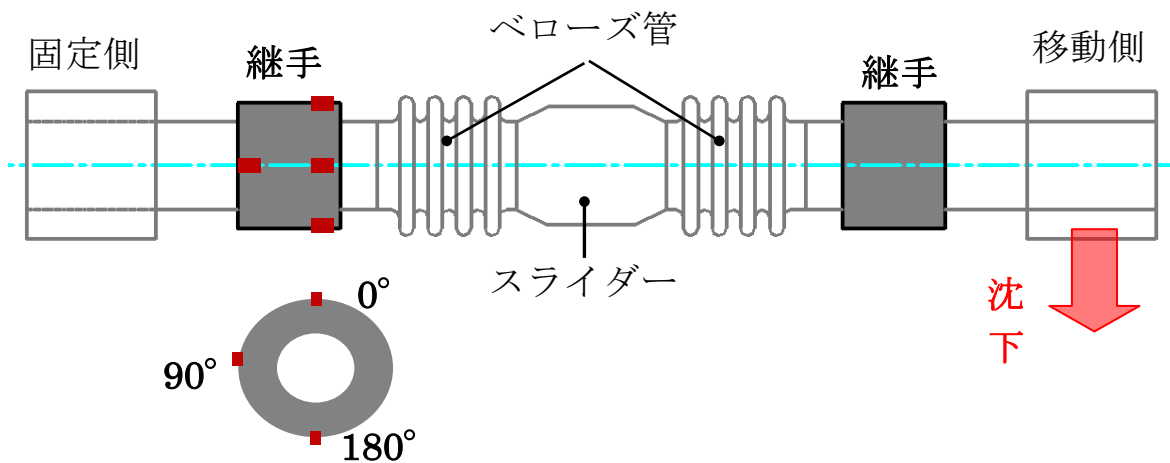


図 4.12 地盤沈下シミュレーション試験概要図

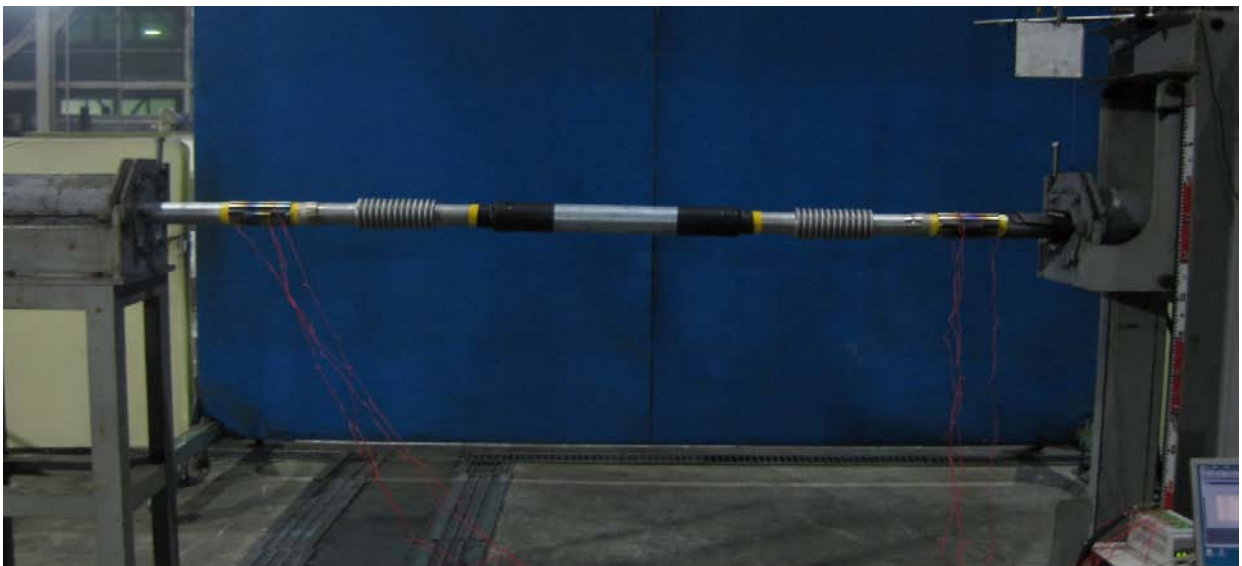


図 4.13 地盤沈下シミュレーション試験前の様子

4. 3 試験結果及び考察

4. 3. 1 継手強度試験結果

継手強度試験によって求められた継手強度と継手長さ中心径比 L/Da との関係について図 4.14 に示す. 本研究で製作した継手はすべて規定値の 14.7kN を上回った. L/Da が増すほど継手強度が増加し, おおよそ比例関係を表している. 理由は接触面積が増すと摩擦抵抗力および接着剤によりせん断力が増加するためである.

また継手肉厚が増すほど継手強度が放物線状に増加している. 過去の研究より継手肉厚 t と継手中心径 Da の関係 $t/Da=7\%$ のときが最適条件¹⁸⁾で, それ以上になると肉厚内の形状回復特性のばらつきが各部で互いに拘束しあい, 締結応力が減少するため継手強度は減少すると考えられている. 本実験の $t=5$ の継手 R9, R11, R14 は $t/Da=7.5\%$ であるにもかかわらず継手強度は急激に増加している. よって継手強度向上の要因は肉厚増加による締結圧力増加による影響だけでなく, 絶縁材の摩擦抵抗が他の継手より発揮された可能性がある.

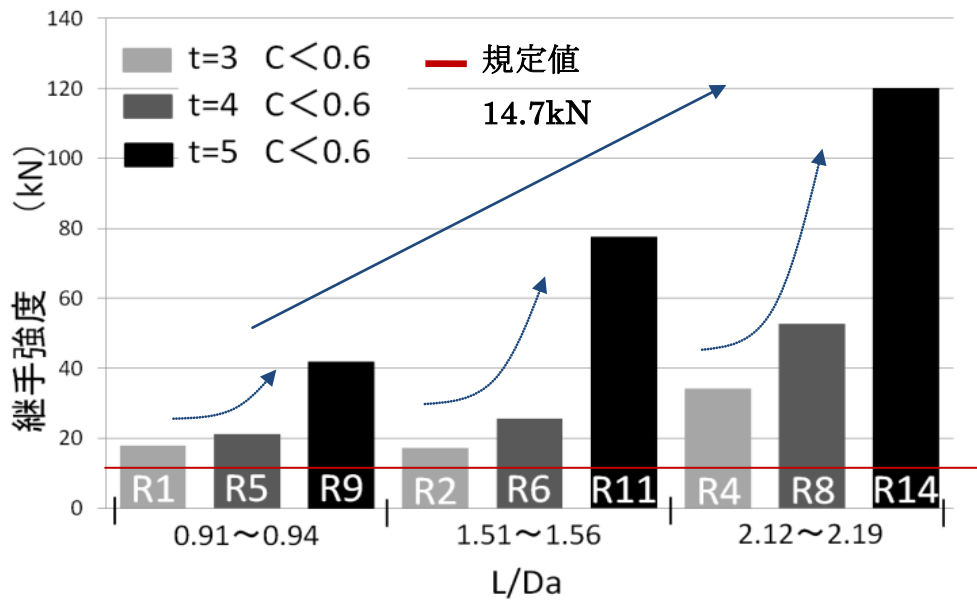


図 4.14 継手強度と継手長さ中心径比の関係

次にクリアランス C と継手強度の関係についてまとめたグラフが図 4.15 である。継手に貼り付けたひずみゲージにより測定した、母管の拘束から解放された時の継手のゲージ解放ひずみ ε_{θ} から求めた継手強度の理論値を求める。本合金のヤング率を E_j とすると、測定した ε_{θ} より (4.1) 式から周方向応力 σ_{θ} が算出される。

$$\sigma_{\theta} = E_j \varepsilon_{\theta} \quad (4.1)$$

また、母管外径を D 、継手肉厚を t とすると、(4.2) 式からその際の継手の締結圧力 p が求められる。

$$p = \frac{2t\sigma_{\theta}}{D} \quad (4.2)$$

そして(4.3)式より計算により継手強度 F を推測することができる。継手と母管の接触距離を L' 、管継手肉厚を t 、母管外径を D 、管継手の周方向形状回復応力を σ_{θ} 、継手・母管間の見かけの摩擦係数を μ とする。

$$F = \pi D L' \cdot \frac{2t\sigma_{\theta}}{D} \cdot \mu = 2\pi L' \sigma_{\theta} \mu \quad (4.3)$$

なお継手・母管間の見かけの摩擦係数 μ は事前の板材による試験より 0.3 で計算している。

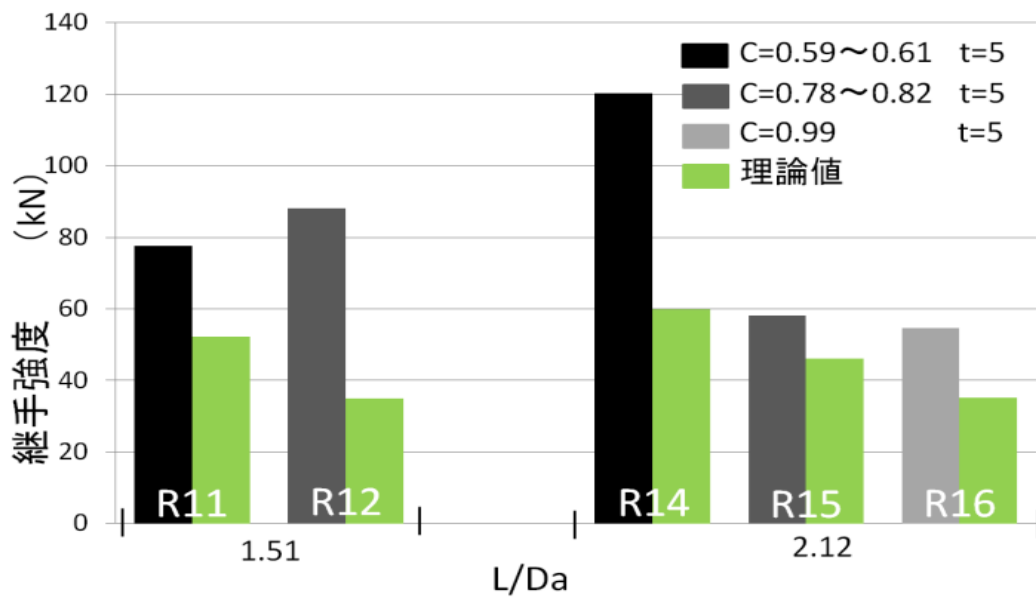


図 4.15 継手強度とクリアランス C の関係

クリアランスが大きい継手は母管との拘束開始までに消費される形状回復ひずみが大きいため、形状回復による周方向応力 σ_{θ} とゲージ解放ひずみ ϵ_{θ} が減少することは第 3 章からも考察できる。しかし R11 と R12 にはあてはまらない。継手と母管のクリアランスに絶縁材と接着剤を挟み込む時はすべて手作業で、クリアランスが小さいほど作業が困難になる。そのため各継手で絶縁材と接着剤の状態に良し悪しがあることが予想される。

4. 3. 2 耐食性試験結果

絶縁材にPIとPIgを使用した継手のみ電気抵抗値 $1M\Omega$ 以上を示したが、継手長さLが120mm以上になると通电してしまう試験片を確認した。管継手長さが長くなるにつれカプトンを接着させた母管を挿入する組立作業が困難になり、耐食性能を確保できる確率が低下する。

4. 3. 3 耐水圧試験結果

クリアランス $C=0.6, 0.8, 1.0$ の3種類はすべて基準である $0.2MPa$ の水圧5分間に耐え、漏水は確認されなかった。 $C=0.6$ の継手は $1MPa$ の水圧でも問題なく、他の条件よりも良好だったためクリアランスを小さくし締結応力を増加させることが耐水性も向上させる要因といえる。ただし絶縁材を隙間無く貼り合わせ、接着剤もムラなく塗ることが条件として挙げられる。

4. 3. 4 地盤沈下シミュレーション試験結果

図4.16に地盤沈下シミュレーション試験後の様子を示す。継手に貼った固定側 90° のゲージのひずみ量からこの試験によって継手には $11.6kN$ の軸力がかかる。地盤沈下シミュレーション試験では、継手・母管ともに損傷は確認されず、継手から抜け落ちることもなく試験は終了した。

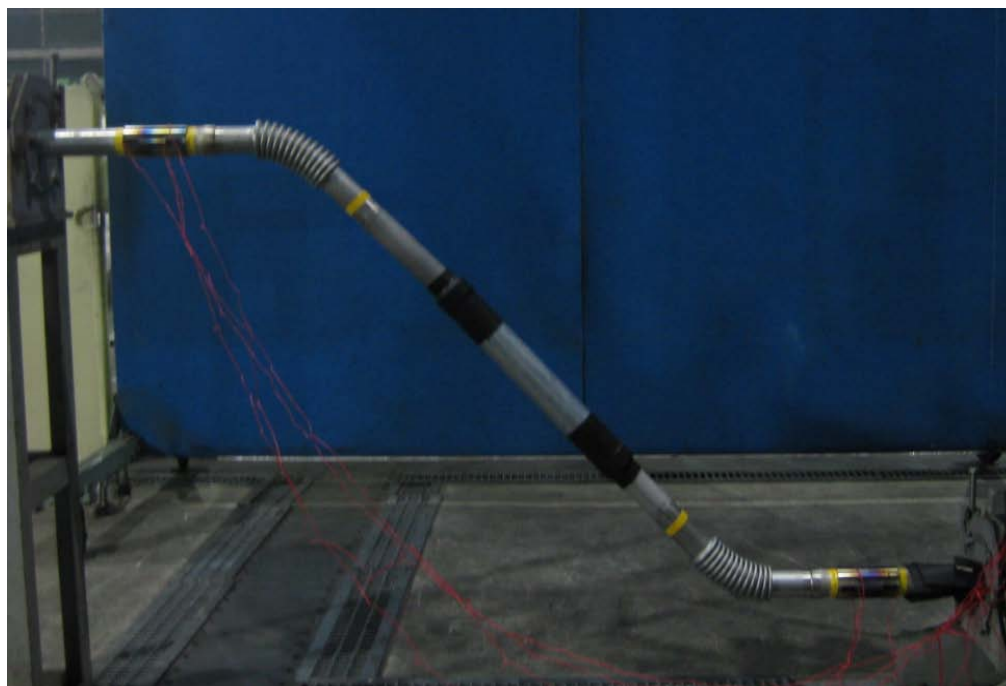


図 4.16 地盤沈下シミュレーション試験後の様子

5. 結論

1) 引張-圧縮の2軸応力による予ひずみと形状回復ひずみ特性研究

- (1) Fe-28%Mn-6%Si-5%Mn合金の引張-圧縮の2軸応力による予ひずみに対する形状回復ひずみ特性は、単軸応力のそれよりも低下する。
- (2) 引張-圧縮の2軸応力による予ひずみは ϵ 相が乱雑に交差し、 $\epsilon \rightarrow \gamma$ 相変態が阻害されてしまうため形状回復特性が低下する。

2) トレーニング処理材の形状回復応力特性の研究

- (1) トレーニング効果は形状回復ひずみ特性を向上させるだけでなく、形状回復応力も向上させる。
- (2) 形状回復ひずみにより発生した形状回復応力と、形状回復ひずみと同じだけのひずみを与えた時の材料に発生する応力は同程度の値を示す。

3) 鉄系形状記憶合金の継手への適用試験

- (1) 継手強度向上の条件は継手長さと継手肉厚を増加させることと、クリアランスを最小限に小さくすることである。
- (2) 耐水性・耐食性向上の条件は絶縁材が継手内部でも隙間をつくらないように、絶縁材のずれや接着剤のムラを防止することである。

参考文献

- 1) 田中喜久昭・戸伏壽昭・宮崎修一：形状記憶合金の機械的特性，養賢堂(1993)
- 2) 牧正志：NMC, 3-2(1990), 15-22.
- 3) A. Sato, E. Chishima, K. Soma and T. Mori: Acta Metal., 30(1982), 1177-1183.
- 4) 佐藤彰一・森勉：日本結晶学会誌, 29-3(1987), 13-20.
- 5) H. Otsuka, M. Murakami and S. Matsuda: Proc. of MRS Int. Mtg. on Advanced Materials, 9(1989), 451-456.
- 6) 丸山忠克・栗田孝：金属, 74(2004), 48-51.
- 7) 久保紘・丸山忠克：電子材料, 41-4(2004), 56-61.
- 8) 棚橋浩之・丸山忠克・花村年裕：日本金属学会講演概要, (1993), 451.
- 9) 粕谷太郎・小幡常雄・三木甫・丸山忠克：地下空間シンポジウム論文・報告集, 7 (2002), 371.
- 1 0) 丸山忠克：2005 年度・形状記憶合金に関する講習会 予稿集, (2006), 57-58.
- 1 1) 西村文仁・渡辺紀子・田中喜久昭：材料, 46-8 (1997), 900-905.
- 1 2) 大塚広明・村上雅人・松田昭一：日本金属学会講演概要(1986), 219
- 1 3) 小池拓：鉄系形状記憶合金の形状回復特性, 法政大学大学院修士論文(2008)
- 1 4) 和田学・直井久・保田英洋・丸山忠克・吉田亨：塑性と加工, 47-548(2006), 61-65.
- 1 5) 宮崎修一・大塚和弘：形状記憶合金, 産業図書(1984)
- 1 6) 宮崎修一・佐久間俊雄他：形状記憶合金の特性と応用展開, シーエムシー(2001)
- 1 7) H. Otsuka, M. Murakami and S. Matsuda : Proc. of MRS Int. Mtg. on Advanced Materials, 9 (1989), 451-456.
- 1 8) 和田学: 鉄基形状記憶合金の形状回復特性と実用化に関する研究, 法政大学大学院博士論文(2007)
- 1 9) 北陸地方無電柱化協議会：無電柱化推進計画
- 2 0) 国土交通省道路局：平成 18 年度達成報告書(2007), 78-83
- 2 1) 土井製作所(株)：地盤沈下対策製品(2004), 3-9 及び私信
- 2 2) 宍倉拡：地盤沈下時における電力埋設管の変形挙動, 法政大学大学院修士論文(2008)
- 2 3) (株)土井製作所：(株)土井製作所ホームページ-無電柱化-次世代型電線共同溝
- 2 4) 東レ・デュポン(株)：ホームページ, 製品案内, カプトン 500H
- 2 5) 西本合成：ホームページ, 耐熱絶縁紙, タフクイン
- 2 6) (株)共和電業：総合カタログ(2007), 1-40

謝 辞

論文作成の終わりにあたり、本研究につきまして懇切丁寧なご指導を賜りました法政大学教授 直井久先生に厚く御礼申し上げます。また共同研究にて種々のご指導を賜りました淡路マテリア株式会社 丸山忠克様, 栗田孝様, 坂井ひろみ様, 株式会社土井製作所 岡田英樹様, 大作誠様に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり、種々の有益なご助言とご指導を賜りました東京工業大学名誉教授 佐藤彰一先生に厚く御礼申し上げます。

本研究の推進にあたり、試験片の製作にあたり丁寧な加工をして頂きました法政大学ワークショップ小山様, 藤巻様には心より感謝いたします。

最後に本研究の遂行において多大な協力をいただいた, 元法政大学工学部機械工学科直井研究室の山本英知氏, 西下祐司氏, 同研究室の皆様には心より感謝の意を表します。