

マンドレル曲げにおける工具形状および材料特性が変形挙動に及ぼす影響

高木, 裕 / Takagi, Hiroshi

(発行年 / Year)

2007-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2007-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2007 年度 修士論文

マンドレル曲げにおける工具形状および
材料特性が変形挙動に及ぼす影響

指導教員 直井 久

大学院工学研究科機械工学専攻修士課程

06R1124

高木 裕

**EFFECT OF MANDREL SHAPE AND EXPERIMENTAL
CONDITIONS
IN MANDREL BENDING ON DEFORMATION BEHAVIOR**

Hiroshi Takagi

Master's Thesis

Graduate School of Engineering

Hosei University

目次

第1章 緒論

1.1 はじめに	4
1.2 熱間マンドレル曲げ法概要	5
1.3 研究目的	6

第2章 実験方法

2.1 鋼管による熱間実験方法	
2.1.1 実験方法	7
2.1.2 測定方法	9
2.1.3 供試管とマンドレルの仕様	10
2.2 アルミ管による冷間実験方法	
2.2.1 実験方法	11
2.2.1 測定方法	12
2.2.2 供試管とマンドレルの仕様	12
2.3 数値解析によるシミュレーション方法	
2.3.1 数値解析の概要	13
2.3.2 数値解析に用いた材料特性	14
2.3.3 温度分布の決定方法	16
2.3.4 解析条件	18
2.4 マンドレルの設計および製作	
2.4.1 マンドレルの形状	19
2.4.2 マンドレルにおける拡張比率	19
2.4.3 拡張率と曲げ半径比の関係式	20
2.4.4 マンドレルにおける拡張部形状の設計方法	22
2.4.5 マンドレルの製作	27

第3章 マンドレル形状が変形挙動に及ぼす影響

3.1 マンドレル形状が成型荷重に及ぼす影響	29
3.2 曲げ半径比 R/D_{OUT} が変形挙動に及ぼす影響	30
3.3 拡径率 D_{OUT}/D_{IN} が変形挙動に及ぼす影響	32
3.4 拡管部長さ比 L/D_{OUT} が変形挙動に及ぼす影響	34
3.5 拡管方向比率が変形挙動に及ぼす影響	35
3.6 曲げ半径比 R/D_{OUT} ・拡径率 D_{OUT}/D_{IN} と肉厚均一性	37

第4章 アルミニウム管による冷間加工と鋼管による熱間加工の

変形挙動の比較

4.1 成型荷重に及ぼす影響	38
4.2 各方向歪に及ぼす影響	39
4.3 応力分布に及ぼす影響	41

第5章 結論

参考資料

謝辞

第1章 緒論

1.1 はじめに

火力発電所や原子力発電所におけるボイラや熱交換器には管の内外で熱を受け渡すために高温、高圧の蒸気や水を通す多数の配管が行われている。化学プラントにおいても熱交換や気体、液体を運ぶために装置の間には配管が多数行われている。また、天然ガス、高圧都市ガス等の気体や石油及び水等の液体において生産設備や貯蔵所と消費地との間はラインパイプと呼ばれる配管で結ばれている。この様に社会に不可欠なプラント、インフラ設備において配管は重要な部材であり、その接続部、曲がり部、分岐部等には溶接継手が使われている。配管にはプラスチック、銅、ステンレス管等も用いられているが鋼管が最も多い。管継手は形状別にエル、ティー、レジューサ等があり、接続方法別に溶接、ねじ込み、フランジ等がある。鋼製溶接式管継手は鋼管と溶接により永久的に接続する管継手で漏れが絶対に許されない極めて信頼性を要する製品である。同管継手には化学成分、内質、強度、靱性、寸法精度、端面仕上げ等厳しい品質が要求される。その中で曲がり部に使用される突合せ溶接式管継手（以下エルボ）はJISで規定されているように曲げ半径は外径の1.0から1.5倍と小さい。外径や肉厚等の規定が直管とほぼ同一であり、周方向に肉厚は等しく、断面は真円を基本としている。エルボの製造法には鋼管を素材とする熱間マンドレル曲げ、押通し曲げ、引曲げ法等と鋼板を素材とするプレス成形法があり、熱間マンドレル曲げ法¹⁾が主流となっている。エルボの使用例を図1.1に示す。



図 1.1 エルボの使用例

1.2 熱間マンドレル曲げ法概要

円管の曲げ法には管に直接曲げモーメントを加えて曲げる方法と管の変形を規制して不等変形を生じさせ、結果として曲げ管を得る方法がある。前者には通常の曲げ法のほとんどが属し、後者には熱間マンドレル曲げ、偏心プラグ曲げ等があり、長手方向だけでなく周方向にも歪を生じている。熱間マンドレル曲げは製品寸法に対して肉厚が大きく、内径が小さい素管を曲がり円錐状のマンドレルに押し込み、拡管しながら曲げる方法であり、熱間で成形を行う。マンドレルは管保持部、圧縮、曲げを同時に行う拡管部、整形部からなる。実生産では後続工程としてプレス成形により断面を真円に矯正し、管端クロップの切断、ベベル加工を施し製品となる。熱間マンドレル曲げの限界曲げ角度は 180° であり、最小曲げ半径は外径の約 1 倍である。熱間マンドレル曲げ法の概要を図 1.2 に示す。

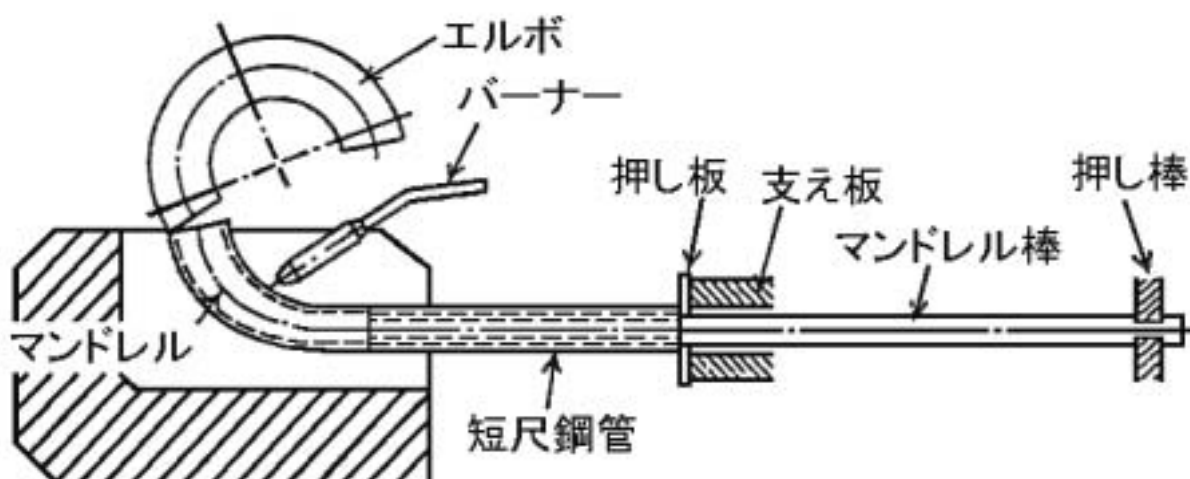


図 1.2 熱間マンドレル曲げ法概要

同法の長所はどの断面をとっても偏肉が少ないこと、断面の扁平化が生じないこと、小さい曲げ半径比の加工が可能なことである。一方、短所は厚肉製品の加工は不適當、直管の中央部分の一部を成形できないこと等が挙げられる。また成形が過酷なため素管は欠陥のないものが必要になる。

1.3 研究目的

熱間マンドレル曲げは生産現場において勘と経験で培われた技術であり、塑性加工学的な観点から詳細な解析があまりされておらず、マンドレル形状、加工条件の最適化が求められている。同法においてマンドレル形状、材料特性が変形挙動の主要な支配因子であり、本研究では実験、解析の両面からそれらが変形挙動、荷重特性に及ぼす影響について明らかにする。

第2章 実験方法

2.1 鋼管による熱間曲げ実験

2.1.1 実験方法

同実験は図 2.2 に示すような装置により行った。素管を複数個差し込んだマンドレルは先端部を 700 から 800 に保たれた加熱炉内に挿入され、後部をサポートで固定されている。プッシャーで素管を押し込み、成形を行った。生産工程においては本法で断面が小判形状の曲げ管に加工した後、プレス加工で断面を真円に矯正するが本実験では工程を省略するためにマンドレル断面を真円にした。素管は STPG370 を用いた。潤滑材は黒鉛と水を混合したものを使用し、炉内温度はサーモレーサで観察した。加熱炉はマンドレルの曲げ外周に向けてバーナーで熱しているため曲げ外周の温度が曲げ内周より高い傾向がある。成形速度は 18mm/min とした。実験条件を表 2.1 に、熱間曲げ法概略を図 2.3 に示す。

表 2.1 熱間マンドレル曲げの実験条件

No.	マンドレル形状				供試管
	拡径比率	D_{OUT}/D_{IN}	R/D_{OUT}	L/D_{OUT}	$D_{OUT} \times T_{IN} \times \text{長さ}$
1	50:50	1.42	1.25	2.00	24.0 × 2.36 × 105

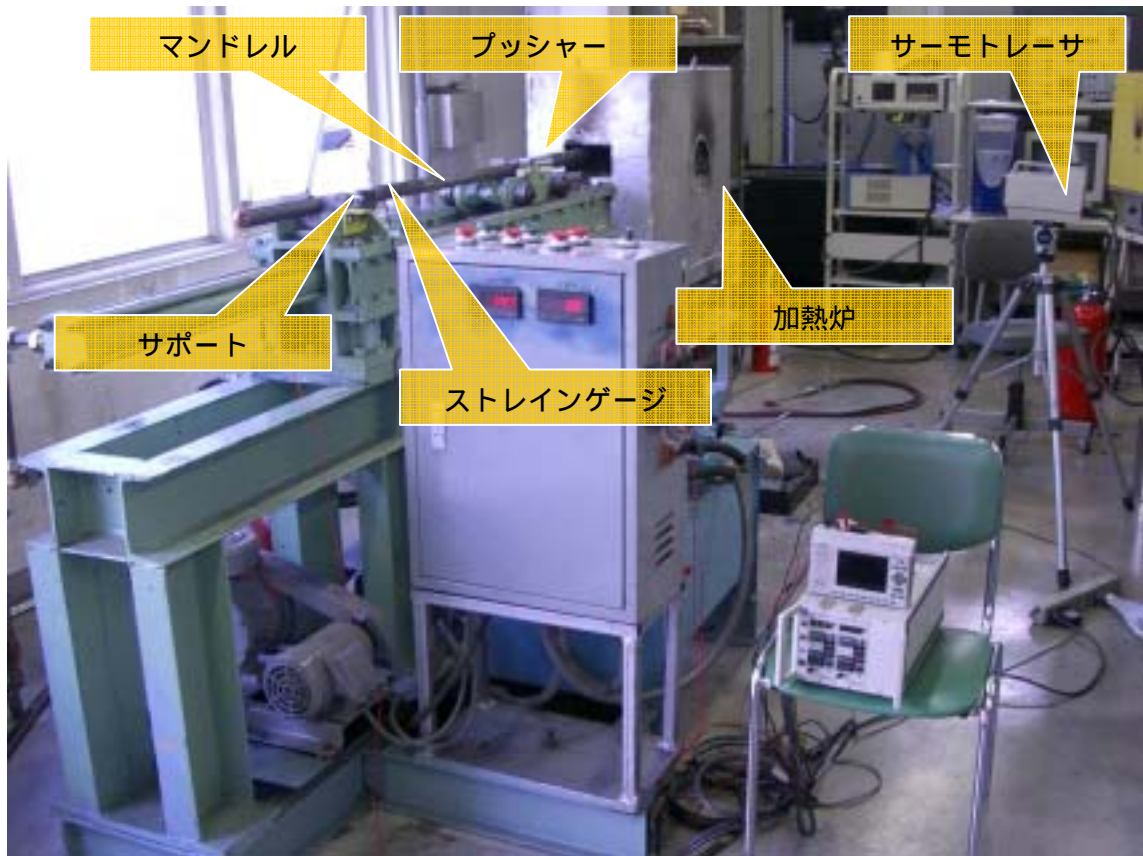


図 2.2 熱間曲げ実験装置

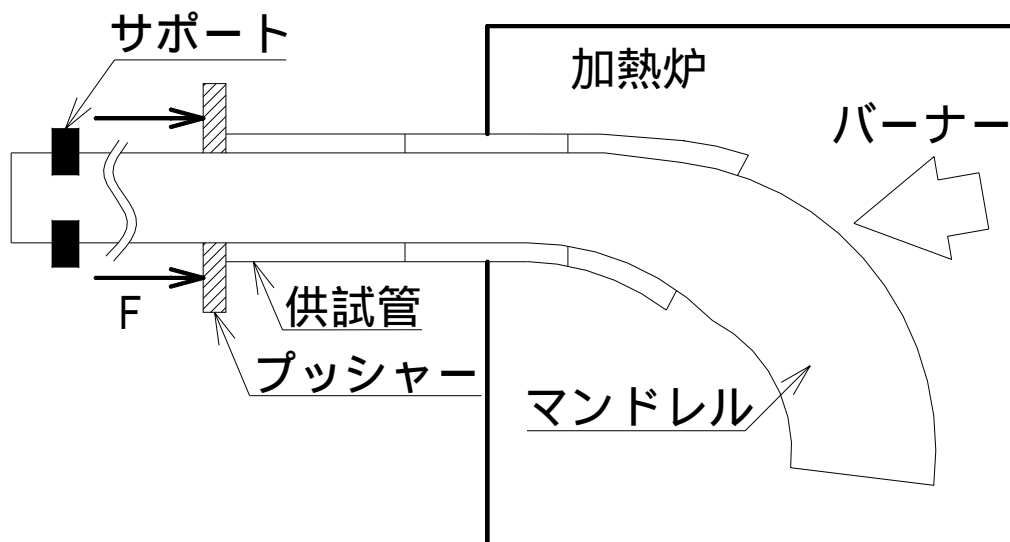


図 2.3 熱間曲げ法概略

2.1.2 測定方法

実験前に供試管外表面の長手，周方向に罫書き線を入れ，その格子寸法を光学顕微鏡により実験前後に測定し，加工歪を算出した．断面の周方向角度は素管曲げ外周を 0° ，曲げ内周を 180° とし，測定箇所は 2 本目以降に成形を行った供試管中央とした．歪の各方向成分と供試管の周方向角度を図 2.4 に示す．成形荷重 F は素管を曲げ管に成形するための軸方向力であり，引張試験機より得られた測定値である．

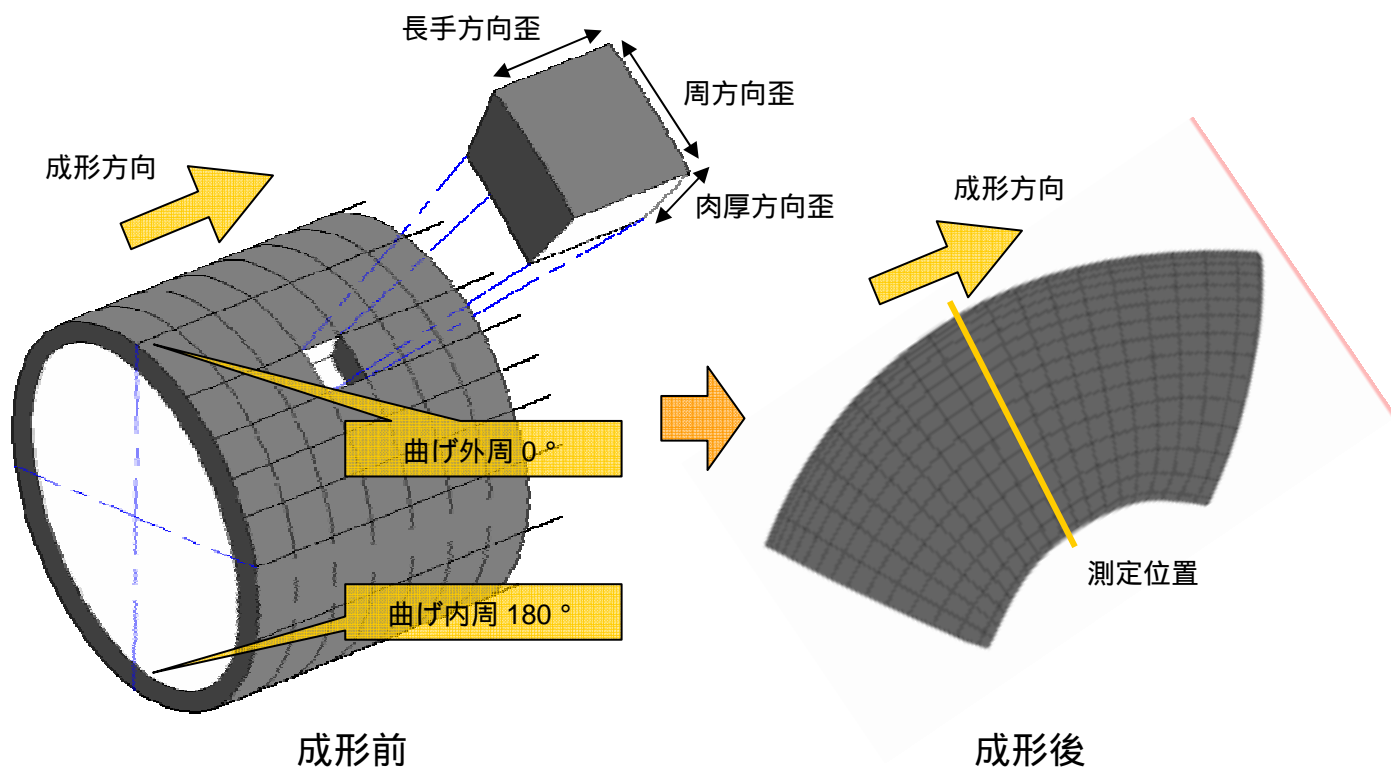


図 2.4 歪の各方向成分と供試管の周方向角度

2.1.3 供試管とマンドレル仕様

供試管 STPG370 の化学成分を表 2.5 に、機械的性質を表 2.6 に示す。試験型マンドレルの鋼種は KHR15N であり、化学成分を表 2.7 に、機械的性質を表 2.8 に示す。

表 2.5 供試管 (STPG370) の化学成分 [mass%]

	C	Si	Mn	P	S
規格値	~ 0.25	~ 0.35	0.30 ~ 0.90	~ 0.004	~ 0.04
実測値	0.20	0.16	0.77	0.0013	0.0002

表 2.6 供試管 (STPG370) の機械的性質

	降伏応力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
規格値	215 ~	370 ~	30 ~
実測値 (常温)	306	471	51
実測値 (800)	74	74	69

表 2.7 マンドレル (KHR15N) の化学成分 [mass%]

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
規格値	0.20 ~ 0.50	~ 2.00	~ 1.50	~ 0.04	~ 0.03	14.0 ~ 18.0	26.0 ~ 30.0
実測値	0.30	0.76	1.40	0.021	0.008	15.33	27.27

表 2.8 マンドレル (KHR15N) の機械的性質

	降伏応力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
規格値 (常温)	310	550	12
規格値 (760)		262	6

2.2 アルミニウム管による冷間実験方法

2.2.1 実験方法

熱間曲げにおいてバーナー加熱では温度を一様に保つことは困難である．そのため，常温において熱間鋼と同等の変形特性を持つアルミニウムを素管とし，実験を行った．冷間曲げ実験装置と冷間曲げ法の概略を図 2.9 に示す．拡管率 D_{OUT}/D_{IN} ，曲げ半径比 R/D_{OUT} ，成形長さ比 L/D_{OUT} が変形挙動に及ぼす影響を検討した．数珠繋ぎにした素管とストリッパーをマンドレルに差し込む．ストリッパーを拘束し，インストロン型引張試験機でマンドレルを引き抜くことによって熱間マンドレル曲げと等価の成形を行った．潤滑剤は二硫化モリブデングリスを用いた．成形速度は 20mm/min とした．冷間実験条件を表 2.10 に示す．

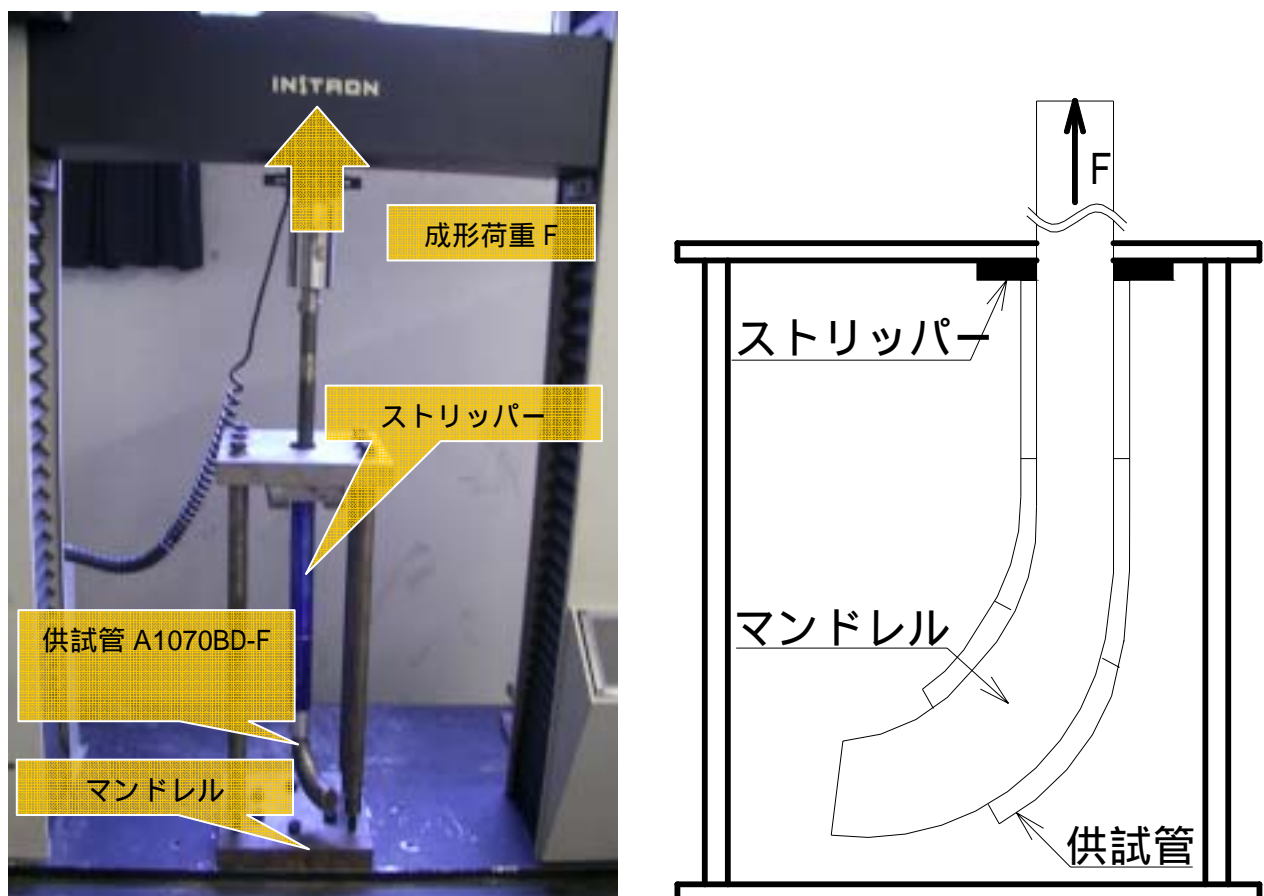


図 2.9 冷間曲げ実験装置と冷間曲げ法概略

表 2.10 冷間曲げの実験条件

No.	マンドレル形状				供試管
	拡径比率	D_{OUT}/D_{IN}	R/D_{OUT}	L/D_{OUT}	$D_{OUT} \times T_{IN} \times \text{長さ}$
2	50:50	1.42	1.25	2.00	24.0 × 2.36 × 105
3	0:100	1.36	1.25	2.00	28.0 × 3.50 × 105
4	30:70	1.36	1.25	2.00	28.0 × 3.50 × 105
5	50:50	1.36	1.25	2.00	28.0 × 3.50 × 105

2.2.2 測定方法

加工歪の測定法は熱間曲げ実験と同一である。成形荷重 F は冷間曲げ実験において直接測定できるが、熱間曲げ実験においてはできないため、マンドレル後部上下左右4箇所 스트レインゲージを貼り、マンドレルの引張歪から算出した。

2.2.3 供試管とマンドレル仕様

供試管として用いた A1070BD-F の化学成分を表 2.11 に、機械的性質を表 2.12 に示す。試験型マンドレルの鋼種は S45C-D9 であり、化学成分を表 2.13 に、機械的性質を表 2.14 に示す。

表 2.11 供試管 (A1070BD-F) の化学成分 [mass%]

	Si	Fe	Mg	Mn	S	Al
規格値	~ 0.20	~ 0.25	~ 0.03	~ 0.05	~ 0.03	~ 99.70
実測値	0.07	0.13	0.01	0.01	0.01	Balance

表 2.12 供試管 (A1070BD-F) の機械的性質

	降伏応力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
規格値	15 ~	55 ~	
実測値	98	105	24

表 2.13 マンドレル (S45C-D9) の化学成分 [mass%]

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
規格値	0.42 ~ 0.48	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.90	~ 0.30	~ 0.35	~ 0.30	~ 0.20	~ 0.20
実測値	0.44	0.21	0.77	0.18	0.25	0.01	0.02	0.16

表 2.14 マンドレル (S45C-D9) の機械的性質

	降伏応力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
規格値	345 ~	570 ~	20 ~

2.3 数値解析によるシミュレーション

2.3.1 数値解析の概要

各実験のシミュレーションを有限要素法解析ソフトウェア MARC/MENTAT で行った。マンドレル及びプッシャー、ストリッパーは剛体とし、摩擦係数は 0.1 である。供試管は面対称のため 1/2 モデルとし、冷間曲げにおいて数量は 1 本のみとした。要素は周方向に 16 分割、肉厚方向に分割を行わなかった。熱間曲げにおいては 1 本のみと実験と同じ長さの複数本とし、拡管部、整形部の温度を 750 一様と 700 から 800 に温度分布を持たせた解析を行った。実験との比較を行うために塑性流動が定常となる領域の歪を測定した。数値解析状況を図 2.15 に示す。

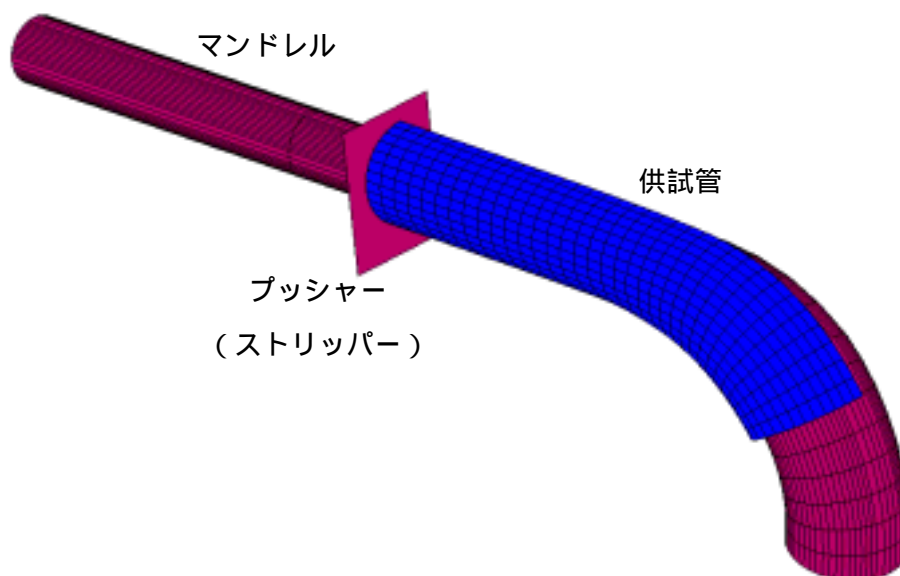


図 2.15 数値解析状況

2.3.2 数値解析に用いた材料特性

JIS B に規格されている一軸引張試験の結果を行いた。A1070 は常温、STPG370 は 700・800・900 度で実験した。STPG370 試験条件を表 2.14 に、A1170 試験条件を表 2.15 に示す。

表 2.14 STPG370 による高温単軸引張試験条件

		歪速度					
		0.00001	0.0001	0.01	0.05	0.1	0.4
温度 [°C]	700	○	○	○	○	○	○
	750	○	○	×	×	○	○
	800	○	○	○	○	○	○
	850	○	○	×	×	○	○
	900	○	○	○	○	○	○

実施

× 未実施

表 2.15 A1070 による常温単軸引張試験条件

	歪速度		
	0.01	0.05	0.1
常温	○	○	○

これらの結果を解析に入力するため、数式化する必要がある。N 乗硬化則の式を基に、重回帰法を行い式化した。重回帰法は重回帰分析とは、p 個の説明変数（独立変数）と 1 個の目的変数（従属変数）の間に式をあてはめ、目的変数の変動が説明変数の変動によってどの程度影響されるかを分析する手法である。数式化した結果次のようになった。ここで

$$\dot{\varepsilon} = \text{歪速度}$$

$$T_k = \text{絶対温度}$$

とする。

$$\sigma = F_{(T_k, \dot{\varepsilon})} \times \varepsilon^{n(T_k, \dot{\varepsilon})}$$

STPG370

$$T_k < 1023$$

$$F_{(T_k, \dot{\varepsilon})} = e^{8.14} \times \dot{\varepsilon}^{0.173} \times e^{\frac{-2.76 \times 10^3}{1023}}$$

$$n_{(T_k, \dot{\varepsilon})} = \left\{ -1.60 + 4.59 \times 10^{-3} \times \ln \dot{\varepsilon} + 1.68 \times 10^{-3} \times (850 + 273) \right\} \times \dot{\varepsilon}^{0.138} \times 1.23 \times 10^{-3} \times (850 + 273)$$

$$1023 < T_k < 1123$$

$$F_{(T_k, \dot{\varepsilon})} = e^{8.14} \times \dot{\varepsilon}^{0.173} \times e^{\frac{-2.76 \times 10^3}{T_k}}$$

$$n_{(T_k, \dot{\varepsilon})} = \left\{ -1.60 + 4.59 \times 10^{-3} \times \ln \dot{\varepsilon} + 1.68 \times 10^{-3} \times T_k \right\} \times \dot{\varepsilon}^{0.138} \times 1.23 \times 10^{-3} \times T_k$$

$$1123 < T_k$$

$$F_{(T_k, \dot{\varepsilon})} = e^{8.14} \times \dot{\varepsilon}^{0.173} \times e^{\frac{-2.76 \times 10^3}{T_k}} + \left\{ 0.825 - 4.44 \times 10^{-2} \times \ln \dot{\varepsilon} - 1.17 \times 10^{-3} \times T_k \right\} \times (T_k - 1123)$$

$$n_{(T_k, \dot{\varepsilon})} = \left\{ -1.60 + 4.59 \times 10^{-3} \times \ln \dot{\varepsilon} + 1.68 \times 10^{-3} \times (850 + 273) \right\} \times \dot{\varepsilon}^{0.138} \times 1.23 \times 10^{-3} \times (850 + 273)$$

A1070

$$F_{(T_k, \dot{\varepsilon})} = 167.0$$

$$n_{(T_k, \dot{\varepsilon})} = 0.13$$

2.3.3 温度分布の決定方法

温度はマンドレルの中心線から周方向角度に応じて変化させる方法をとった。解析上の座標系は図 2.16 に示すように X 軸、Y 軸をとる。Z 軸は図に垂直手前方向に正をとる。管保持部と拡管部の境界断面の中心を原点 O とする。拡管部と整形部の境界断面の中心と原点の垂直二等分線と X 軸の交点を P (xp, yp, zp), 整形部の曲げ中心を Q (xq, yq, zq) とする。点 P を中心とし、原点 O を通る円弧の半径を R1, 整形部の曲げ半径を R2 とする。拡管部の角度は [deg], 拡管部と整形部の境界面と Y 軸の交点の y 座標を b とする。

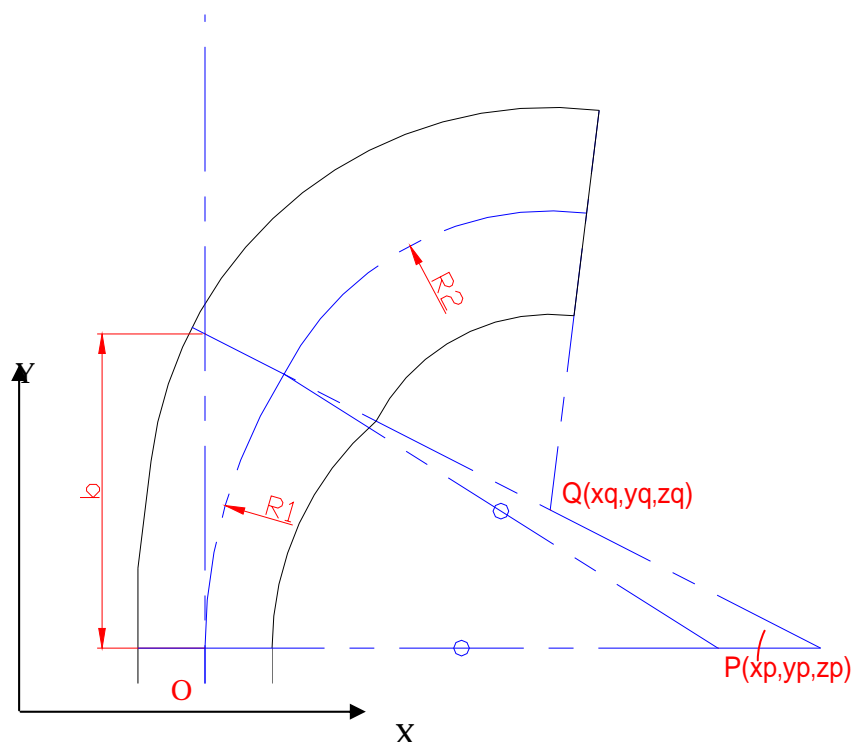


図 2.16 解析におけるマンドレルの座標系

曲げ外周を 800 , 曲げ内周を 700 におけるサブルーチンの一部を下記に示す。

要素は 6 面体であり、1 要素あたりの節点数は 8 である。供試管の節点座標 G(gx, gy, gz) が読み込まれ、その温度 sv(1, i) を出力する。

$$x1=gx-xp$$

$$y1=gy-yp$$

$$z1=gz-zp$$

; 点 P からの相対座標

$$x2=gx-xq$$

$$y2=gy-yq$$

$$z2=gz-zq$$

; 点 Q からの相対座標

```

s1=(x1**2+y1**2)**0.5-R1 ; R1 を半径とする円弧から XY 平面上に投影した G ま
                           ; での距離ベクトル . 円弧の外側を正とする
s2=(x2**2+y2**2)**0.5-R2 ; 整形部の中心線から XY 平面上に投影した G までの
                           ; 距離ベクトル . 円弧の外側を正とする

pi=3.14159265 ; 円周率
wall=tan(- /180*pi)*gx+b ; 拡管部と整形部の境界面

do i=1,8
  if(gy.gt.wall)then ; 整形部のとき
    sv(1,i)=800-100*atan2(z2,s2)/pi ; node の温度 . atan2(a,b)=arctan(a/b)

  else if(gy.gt.0)then ; 拡管部のとき
    sv(1,i)=800-100*atan2(z1,s1)/pi

  else if(gy.gt.-40)then ; 管保持部の一部
    sv(1,i)=800-100*atan2(gz,-gx)/pi

  else ; 管保持部のとき
    sv(1,i)=25

  end if
end do

```

2.3.4 解析条件

これらの条件において、拡管率 D_{OUT}/D_{IN} 、曲げ半径比 R/D_{OUT} 、成形長さ比 L/D_{OUT} が変形挙動に及ぼす影響を検討した。曲げ半径比を3種類、拡径率を3種類、拡管部長さ比を3種類決め、考えられるすべての形状において冷間解析で行った。解析条件を表1に示す。また、拡管方向比率の比較は実験結果より考察する。解析条件を表2.17に示す。

表 2.17 解析条件

No.	マンドレル形状			
	拡径比率	D_{OUT}/D_{IN}	R/D_{OUT}	L/D_{OUT}
6	0:100	1.30	1.00	1.00
7	0:100	1.30	1.25	1.00
8	0:100	1.30	1.50	1.00
9	0:100	1.36	1.00	1.00
10	0:100	1.36	1.25	1.00
11	0:100	1.36	1.50	1.00
12	0:100	1.44	1.00	1.00
13	0:100	1.44	1.25	1.00
14	0:100	1.44	1.50	1.00
15	0:100	1.30	1.00	1.50
16	0:100	1.30	1.25	1.50
17	0:100	1.30	1.50	1.50
18	0:100	1.36	1.00	1.50
19	0:100	1.36	1.25	1.50
20	0:100	1.36	1.50	1.50
21	0:100	1.44	1.00	1.50
22	0:100	1.44	1.25	1.50
23	0:100	1.44	1.50	1.50

No.	マンドレル形状			
	拡径比率	D_{OUT}/D_{IN}	R/D_{OUT}	L/D_{OUT}
24	0:100	1.30	1.00	2.00
25	0:100	1.30	1.25	2.00
26	0:100	1.30	1.50	2.00
27	0:100	1.36	1.00	2.00
28	0:100	1.36	1.25	2.00
29	0:100	1.36	1.50	2.00
30	0:100	1.44	1.00	2.00
31	0:100	1.44	1.25	2.00
32	0:100	1.44	1.50	2.00

2.4 マンドレルの設計および製作

2.4.1 マンドレルの形状

マンドレルは管保持部、圧縮、曲げと同時に行う拡管部、整形部からなり、断面は常に真円である。ここで素管外径を D_{IN} 、肉厚を t_{IN} 、マンドレル拡管部の中心線長さを L 、整形部の曲げ半径を R 、曲げ管の外径を D_{OUT} 、肉厚を t_{OUT} とする。拡管率を D_{OUT}/D_{IN} 、曲げ半径比を R/D_{OUT} 、成形長さ比を L/D_{OUT} 、肉厚外径比を t_{OUT}/D_{OUT} とする。マンドレル、供試管の各寸法を図 2.18 に、マンドレルの形状を示す。

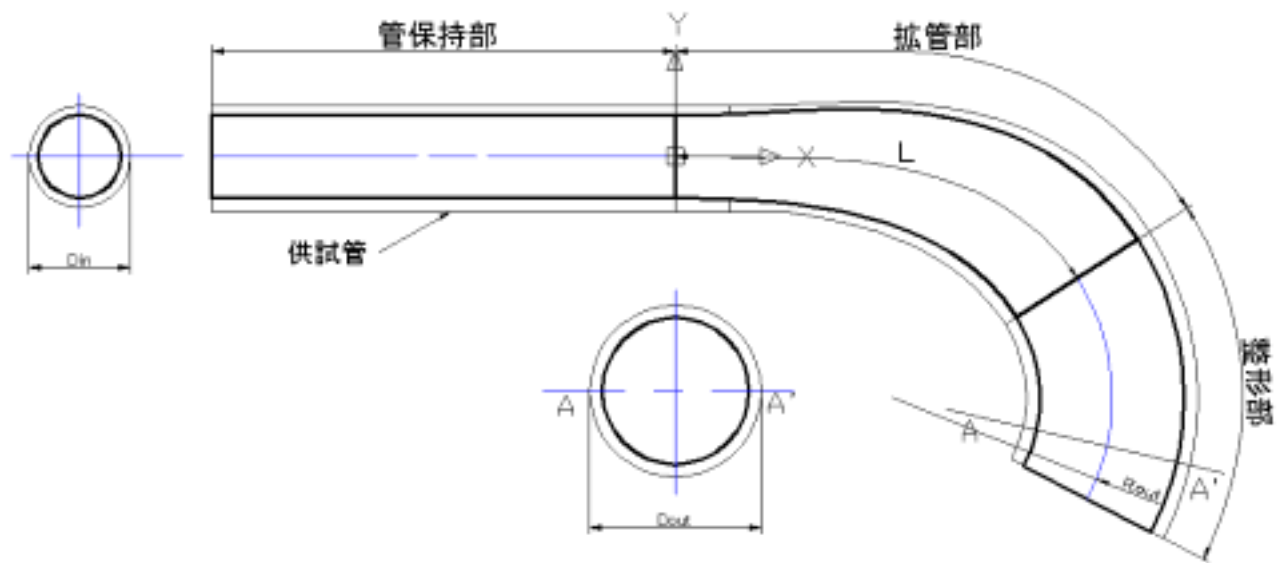


図 2.18 マンドレル形状

2.4.2 マンドレルにおける拡径方向

拡径方向の定義を図 2.19 に示す。拡管方向比率とは拡管方向基準軸を設け、これに対して上下方向に拡管を行う割合である。

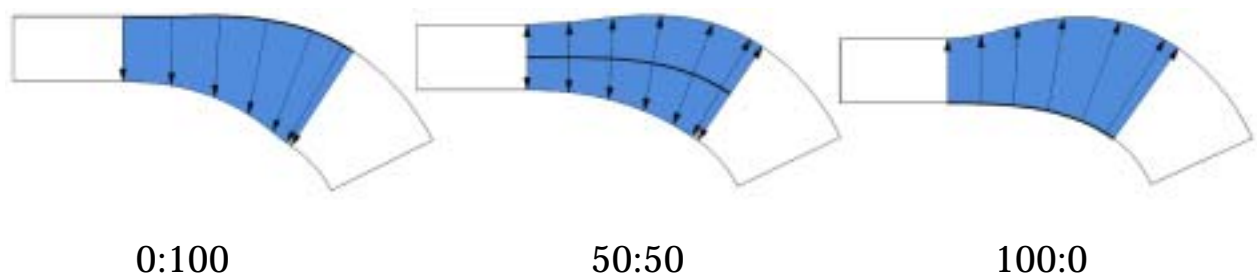


図 2.19 拡管方向比率

2.4.3 拡管率と曲げ半径比の関係式

熱間マンドレル曲げの適正な拡管率と曲げ半径比の関係を算出した。図 2.20 のように拡管部において供試管を管外周の曲げ中立軸 N-N で曲げると中立軸からの距離に応じて軸方向圧縮により増肉が生じる。この圧縮歪を拡管により周方向歪に全て変換することで肉厚が均一になると仮定した。素管の半径を $r (=D_N/2)$ 、X 軸から素管表面の任意の点 P までの角度を θ とする。

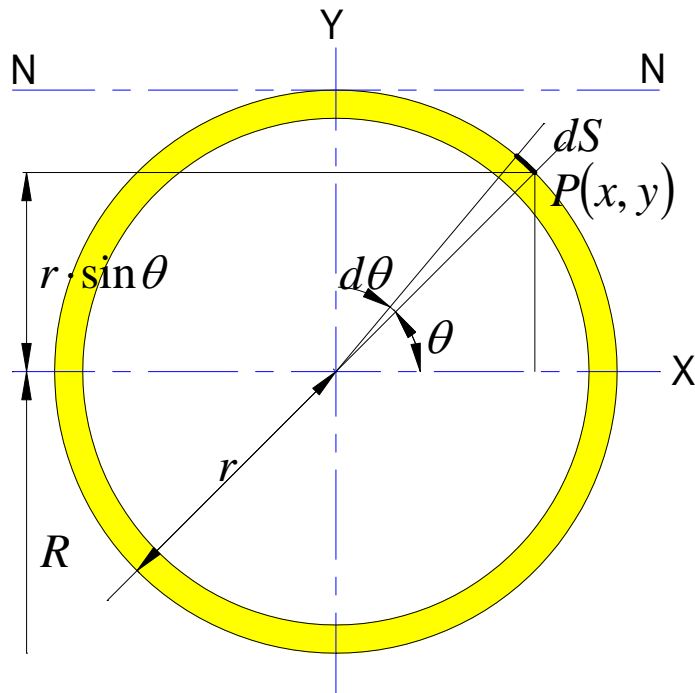


図 2.20 供試管断面における任意の点 P

任意の点 P における長手方向の圧縮率 $1/\lambda$ は式(2.1)のようになる。

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R + r \sin \theta}{R + r} \quad (2.1)$$

よって、任意の点 P における周方向の拡管率 λ は式(2.2)のように求められる。

$$\lambda = \frac{R + r}{R + r \sin \theta} \quad (2.2)$$

また、微小角度 d より、素管の微小周長 dS_0 及び曲げ管の微小周長 dS が求められ、式(2.3)、(2.4)に示す。

$$dS_0 = r \cdot d\theta \quad (2.3)$$

$$dS = \lambda \cdot r \cdot d\theta = \frac{R+r}{R+r \sin \theta} \cdot r \cdot d\theta \quad (2.4)$$

式(2.4)より曲げ管の全周長 S が求められる .

$$S = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} dS = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{R+r}{R+r \sin \theta} \cdot r \cdot d\theta \quad (2.5)$$

このとき素管の半径より曲げ半径が大きいこと ($r^2 < R^2$) より , 全周長 S は式(2.5)から以下のように求められる .

$$\begin{aligned} S &= 2r(R+r) \left[\frac{2}{\sqrt{R^2-r^2}} \arctan \left(\frac{R \tan(\theta/2) + r}{\sqrt{R^2-r^2}} \right) \right]_{-\pi/2}^{\pi/2} \\ &= \frac{4r(R+r)}{\sqrt{R^2-r^2}} \left[\arctan \left(\frac{R \tan(\pi/4) + r}{\sqrt{R^2-r^2}} \right) - \arctan \left(\frac{R \tan(-\pi/4) + r}{\sqrt{R^2-r^2}} \right) \right] \\ &= \frac{4r(R+r)}{\sqrt{R^2-r^2}} \left[\arctan \left(\frac{R+r}{\sqrt{R^2-r^2}} \right) - \arctan \left(\frac{-R+r}{\sqrt{R^2-r^2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで , 拡管率は周長の比であるので式(2.7)が求まる .

$$\begin{aligned} \frac{D_{OUT}}{D_{IN}} &= \frac{S}{2\pi r} \\ &= \frac{2(R+r)}{\pi \sqrt{R^2-r^2}} \left[\arctan \left(\frac{R+r}{\sqrt{R^2-r^2}} \right) - \arctan \left(\frac{-R+r}{\sqrt{R^2-r^2}} \right) \right] \\ &= \frac{2(1+r/R)}{\sqrt{1-(r/R)^2}} \left[\arctan \left(\frac{1+r/R}{\sqrt{1-(r/R)^2}} \right) - \arctan \left(\frac{-1+r/R}{\sqrt{1-(r/R)^2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

したがって , 熱間マンドレル曲げにおける拡管率 D_{OUT}/D_{IN} と素管外径 D_{IN} , 曲げ半径 R の関係は式(2.8)となる .

$$\frac{D_{OUT}}{D_{IN}} = \frac{2\left(1 + \frac{D_{IN}}{2R}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_{IN}}{2R}\right)^2}} \left[\arctan\left(\frac{1 + \frac{D_{IN}}{2R}}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_{IN}}{2R}\right)^2}}\right) - \arctan\left(\frac{-1 + \frac{D_{IN}}{2R}}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_{IN}}{2R}\right)^2}}\right) \right] \quad (2.8)$$

この式に素管外径と曲げ半径の比 D_{IN}/R を代入すると、拡管率 D_{OUT}/D_{IN} が求まり、その比と拡管率から曲げ半径比 R / D_{OUT} を求めることができる。

2.4.4 マンドレルにおける拡管部の形状設計

マンドレル拡管部は成形の大部分を行う重要な部位である。拡管部形状を以下のように決定した。成形過程において曲率の変化に応じて拡管させることで負荷配分を均一化させた。曲率増分は加工に必要な曲げモーメントの増分を意味するものであり、曲率の変化が実生産型のようにステップ状であると応力や歪の集中を生じる。また、曲率の変化が一定であると、拡管も一定となるので管保持部と拡管部、拡管部と整形部の境界で特異点となる。試験型は曲率増分、拡管に三角関数の緩和曲線を採用した。試験型マンドレル拡管部の設計方法は以下の通りとした。

マンドレルの曲率変化を図 2.21 に示す。ステップ数を $i=0, 1, 2, \dots, N$ とすると、 $D_{(0)}$ はマンドレル管保持部の直径、 $D_{(N)}$ はマンドレル整形部の直径である。

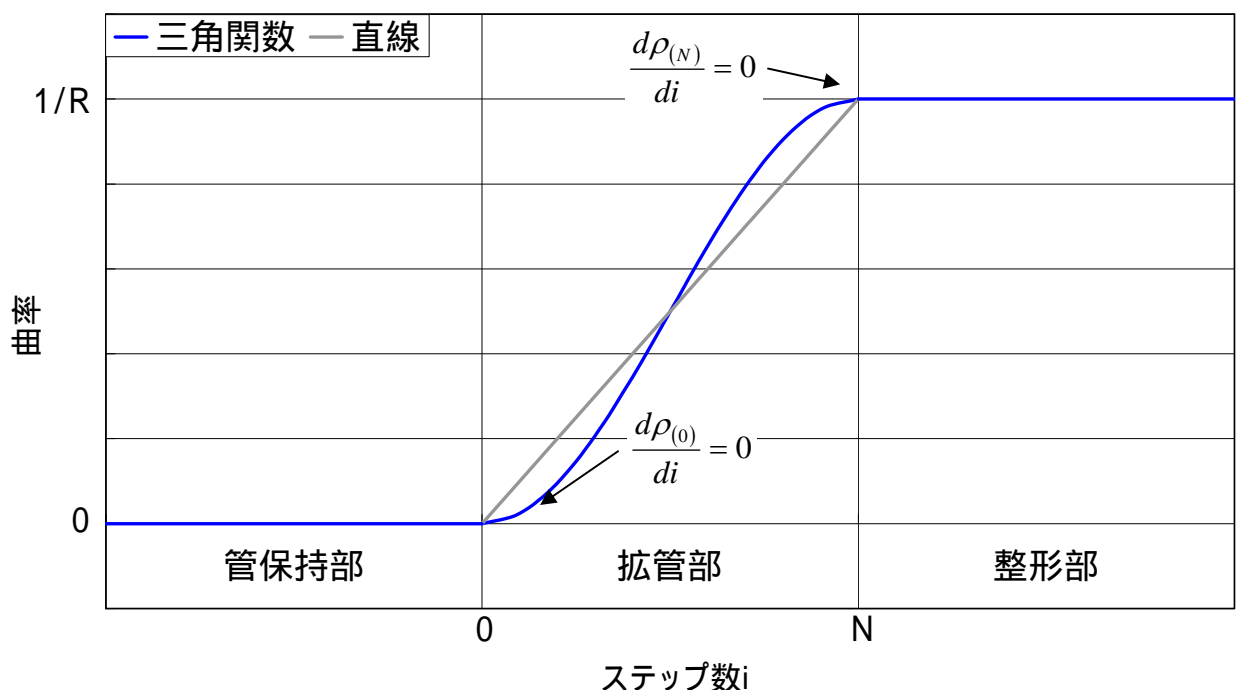


図 2.21 マンドレルの曲率変化

各ステップにおいて曲率の変化に応じて拡管し，負荷配分を均一化するために曲率増分，
 拡管を比例関係とする．

$$\frac{d\rho_{(i)}}{di} = a \frac{dD_{(i)}}{di} \quad (2.9)$$

ここで， a ：定数

式(2.9)の両辺を積分すると式(2.10)となる．

$$\rho_{(i)} = aD_{(i)} + b \quad (2.10)$$

ここで， b ：定数

曲率増分を一定にするとマンドレルの負荷配分は均一化されるが管保持部から拡管部，
 拡管部から整形部にかけて特異点を生じる．そのため式(2.11)，(2.12)の条件が必要と
 なる．

$$\begin{aligned} \frac{dD_{(0)}}{di} &= 0 \\ \frac{dD_{(N)}}{di} &= 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{(0)}}{di} &= 0 \\ \frac{d\rho_{(N)}}{di} &= 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

式(2.11)，(2.12)を満たす適当な関数として三角関数を用いた．マンドレル拡管部の曲
 率を式(2.13)に，直径を式(2.14)に示す．

$$\rho_{(i)} = \frac{1}{2} \left\{ \sin \left(\frac{\pi}{N} i - \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right\} \rho_{(N)} \quad (2.13)$$

$$D_{(i)} = D_{(0)} + \frac{1}{2} \left\{ \sin \left(\frac{\pi}{N} i - \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right\} (D_{(N)} - D_{(0)}) \quad (2.14)$$

図 2.22 に示すように拡管部中心線の座標位置は微小長さ dL を底辺とする二等辺三角形の頂角 $d\theta_{(i)}$ によって決まる .

$$d\theta_{(i)} = 2 \arcsin \left(\frac{dL/2}{1/\rho_{(i)}} \right) \quad (2.15)$$

拡管部の中心線の長さを L とするとステップ数により等分した微小長さ dL は L/N となる .

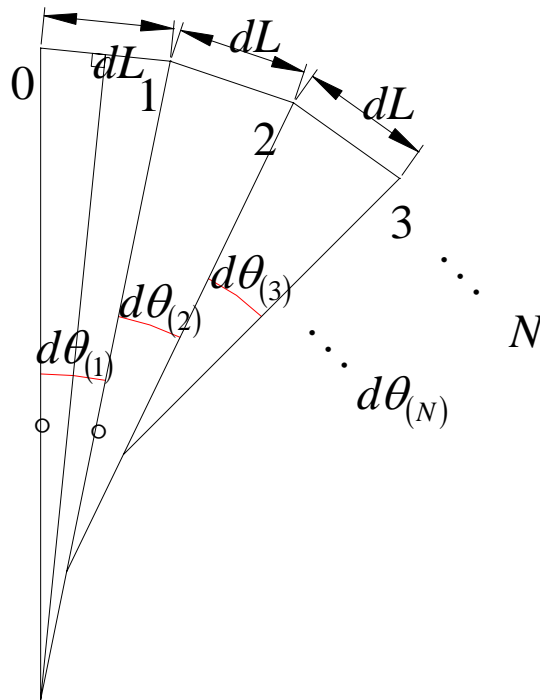


図 2.22 拡管部中心線の作図方法

式(2.15)は $i=1, 2, \dots, N$ で成り立つ . このとき拡管部中心線の座標 $(X_{C(i)}, Y_{C(i)})$ を式(2.16)に示す .

$$\begin{aligned} X_{C(i)} &= \frac{1}{\rho_{(i)}} \left\{ \cos \left(\frac{\pi}{2} - \sum_{m=1}^i d\theta_{(m)} \right) - \cos \left(\frac{\pi}{2} - \sum_{m=1}^{i-1} d\theta_{(m)} \right) \right\} + X_{C(i-1)} \\ Y_{C(i)} &= \frac{1}{\rho_{(i)}} \left\{ \sin \left(\frac{\pi}{2} - \sum_{m=1}^i d\theta_{(m)} \right) - \sin \left(\frac{\pi}{2} - \sum_{m=1}^{i-1} d\theta_{(m)} \right) \right\} + Y_{C(i-1)} \end{aligned} \quad (2.16)$$

$i=0$ においては式(2.17)のようになる .

$$X_{C(0)} = Y_{C(0)} = 0 \quad (2.17)$$

式(2.16)より $i=1, 2, \dots, N$ における拡管部曲げ外周の座標 ($X_{EXTRADOS(i)}, Y_{EXTRADOS(i)}$) を式(2.18)に示す .

$$\begin{aligned} X_{EXTRADOS(i)} &= \frac{D_{(i)}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \sum_{m=1}^i d\theta_{(m)}\right) + X_{C(i)} \\ Y_{EXTRADOS(i)} &= \frac{D_{(i)}}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \sum_{m=1}^i d\theta_{(m)}\right) + Y_{C(i)} \end{aligned} \quad (2.18)$$

$i=0$ においては式(2.19)のようになる .

$$\begin{aligned} X_{EXTRADOS(0)} &= 0 \\ Y_{EXTRADOS(0)} &= \frac{D_{(0)}}{2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

同様に $i=1, 2, \dots, N$ における拡管部曲げ内周の座標 ($X_{INTRADOS(i)}, Y_{INTRADOS(i)}$) を式(2.20)に示す .

$$\begin{aligned} X_{INTRADOS(i)} &= -\frac{D_{(i)}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \sum_{m=1}^i d\theta_{(m)}\right) + X_{C(i)} \\ Y_{INTRADOS(i)} &= -\frac{D_{(i)}}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \sum_{m=1}^i d\theta_{(m)}\right) + Y_{C(i)} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$i=0$ においては式(2.21)のようになる .

$$\begin{aligned} X_{EXTRADOS(0)} &= 0 \\ Y_{EXTRADOS(0)} &= -\frac{D_{(0)}}{2} \end{aligned} \quad (2.21)$$

これらの拡管部中心線 ,曲げ外周 ,内周の XY 座標から作図したマンドレル形状を図 2.23 に示す . マンドレル形状は拡管率 D_{OUT}/D_{IN} , 曲げ半径比 R/D_{OUT} , 成形長さ比 L/D_{OUT} によって決定される .

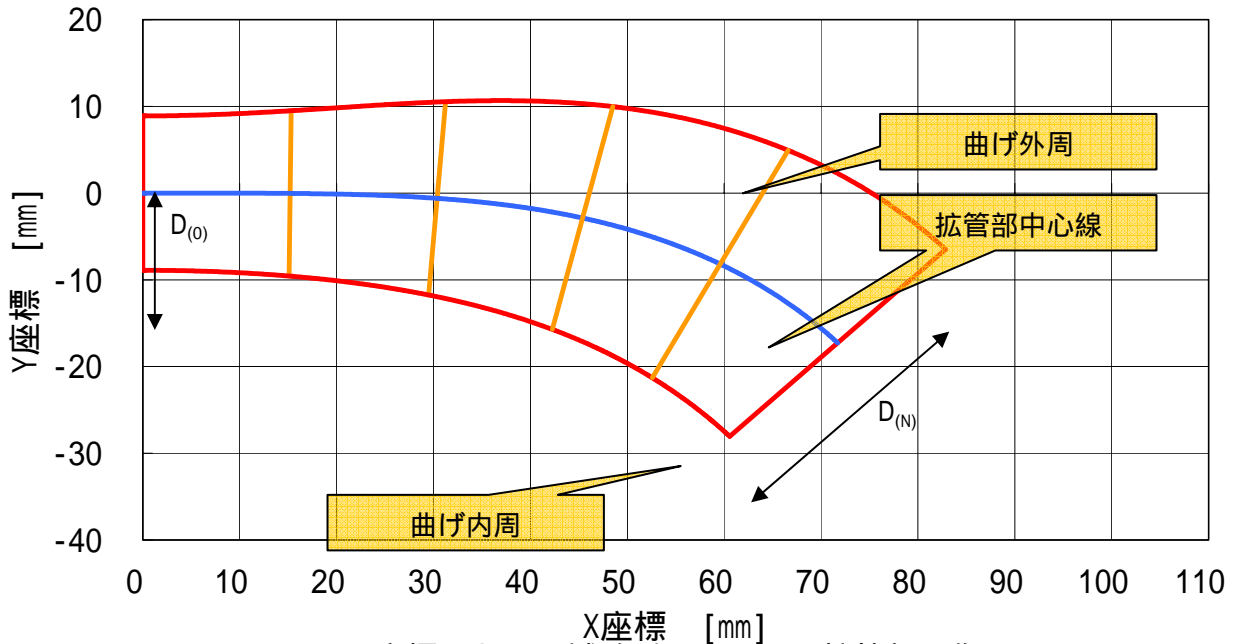


図 2.23 XY 座標における試験型マンドレル拡管部の作図

マンドレルの作図は図 2.24 に示すように 3D-CAD ソフトウェア SolidWorks で行った . 前述した曲げ外周 , 内周の座標を平面にプロットする . そのプロット点をつなぎガイドカーブを作成する . 管保持部と拡管部 , 拡管部と整形部の境界断面を作成し , 断面とガイドカーブで立体化する .

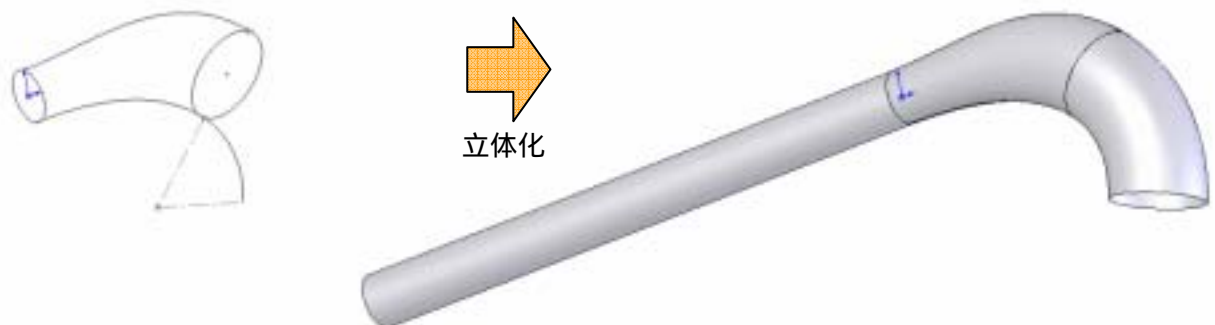


図 2.24 SolidWorks によるマンドレル作図

2.4.5 マンドレルの製作

マンドレルの製作，解析手順は図 2.25 のように行った．マンドレルの設計，作図は前述した方法で行い，SLD（ソリッド）ファイル，IGIS ファイルを作成する．CAM ソフトウェアはこの SLD ファイルを，CAE ソフトウェアは IGIS ファイルを取り込む．CAE ソフトウェアは MARC/MENTAT を用い，数値解析シミュレーションを行った．CAM ソフトウェアは ESPRIT を用い，マンドレルの加工シミュレーション，NC データの作成を行った．マシニングセンタ Funuc 社製 Robodrill 16i で NC データを読み込み，3 軸制御の CNC 切削加工を行った．

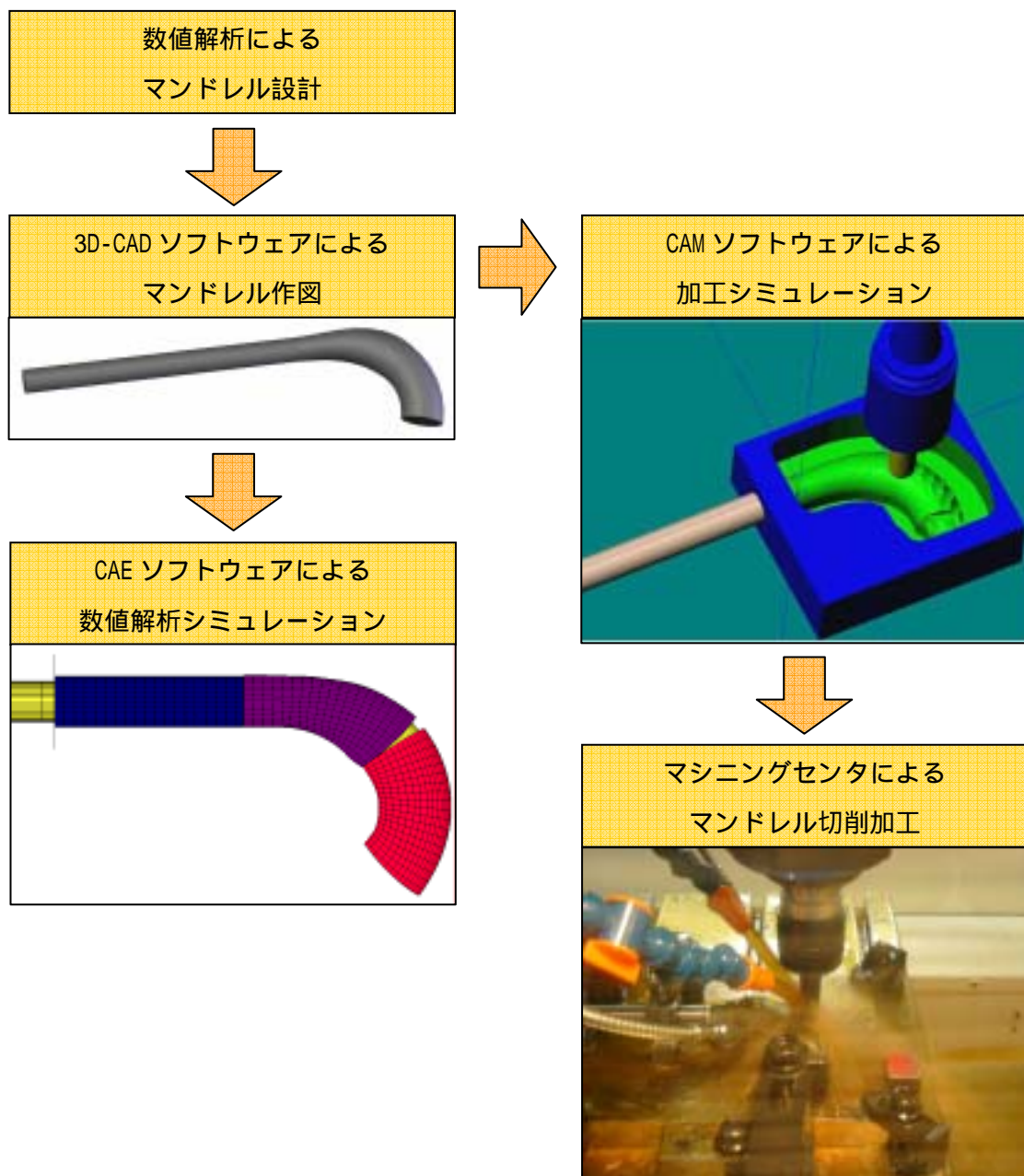



図 2.25 マンドレルの製作，解析手順

順序は、3DCAD を用いてマンドレルの設計を行い、CAM によってマシニングセンタで使用するプログラムを作成する。マンドレルは、ブロック材もしくは鋳物を用意し、管保持部のみあらかじめ旋盤にて加工を行う。その後、マシニングセンタにてプログラムを用いて切削加工を施した。切削の様子と切削したマンドレルを図 2.26 に示す。また、本実験で使用した切削条件を表 2.27 に示す。



図 2.26 (左)切削の様子 (中)切削途中 (右)完成品

表 2.27 切削条件

	荒削り加工	中仕上げ加工	仕上げ加工
トレランス	0.25	0.25	0.01
許容残り代	1mm	0.3mm	0mm
工具動作	オフセット	面沿い	面沿い
工具径比率	50%	-	-
増分深さ	0.5mm	-	-
境界輪郭加工	フィーチャ	面沿い	面沿い
パス数	-	100	200
パス経路			

第3章 マンドレル形状が変形挙動に及ぼす影響

3.1 マンドレル形状が成型加荷重及ぼす影響

No.6-No.32 について、拡径率・曲げ半径比・拡管方向比率・拡管部長さ比と成型荷重の関係を調査した。これらのうち、拡管部長さ比=1.5 における拡径率・曲げ半径比と成型加荷重を図3.1 に示す。拡径率が大きくなるほど、また曲げ半径比が小さくなるほど成型荷重が高くなった。拡径率が大きくなると周方向歪が増加し、曲げ半径比が小さくなると長手方向歪が増加するためである。

これらの結果について回帰分析を行い、マンドレル形状の支配因子と解析荷重の関係を算出した。解析における成型荷重式を式(2)に示す。

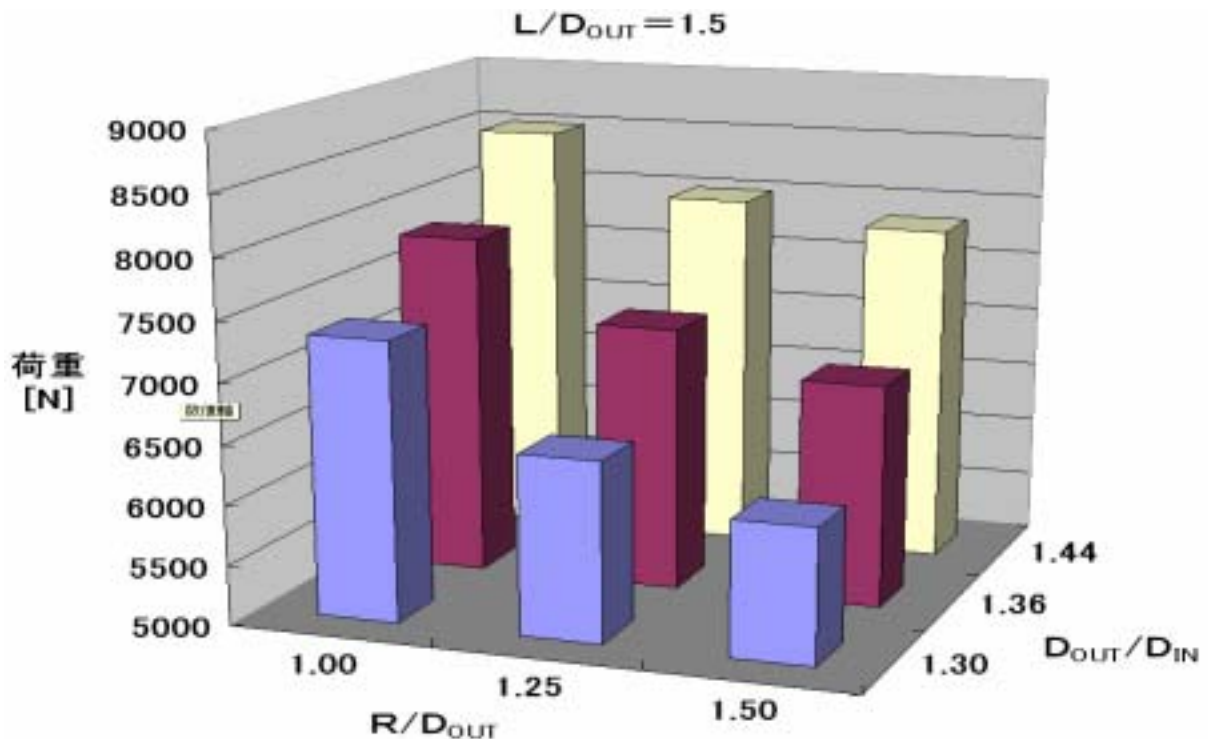


図 3.1 拡径率・曲げ半径比と成型荷重の関係

$$W = -4256 \times \frac{R}{D_{OUT}} + 14846 \times \frac{D_{OUT}}{D_{IN}} + 195 \times \frac{L}{D_{OUT}} \quad (3.1)$$

3.2 曲げ半径比 R/D_{OUT} が変形挙動に及ぼす影響

No.15・No.16・No.17 より、曲げ半径比 R/D_{OUT} と周方向歪 ϵ_θ ・長手方向歪 ϵ_l の関係を図 3.2 に示す。長手方向では曲げ内周に向かう程大きな圧縮歪を生じ周方向では大きな引張歪を生じた。これは拡管による周方向応力が断面全体に作用するのに対し、曲げによる長手方向応力が曲げ外周部で作用せず、曲げ内周部で最大となるので曲げ内周部で選択的に変形が生じたと考えられる。曲げ半径比が大きくなるほど長手方向歪は曲げ内周で減少し、曲げ外周で増加した。これは曲げ半径比が大きくなることにより、軸方向への圧縮力が少なくなったためである。これにより曲げ半径比が大きくなると曲げに対して軸方向圧縮力が減少し、曲げ中立軸が内側に移動すると考えられる。また、曲げ半径比が大きくなるほど周方向歪は減少した。

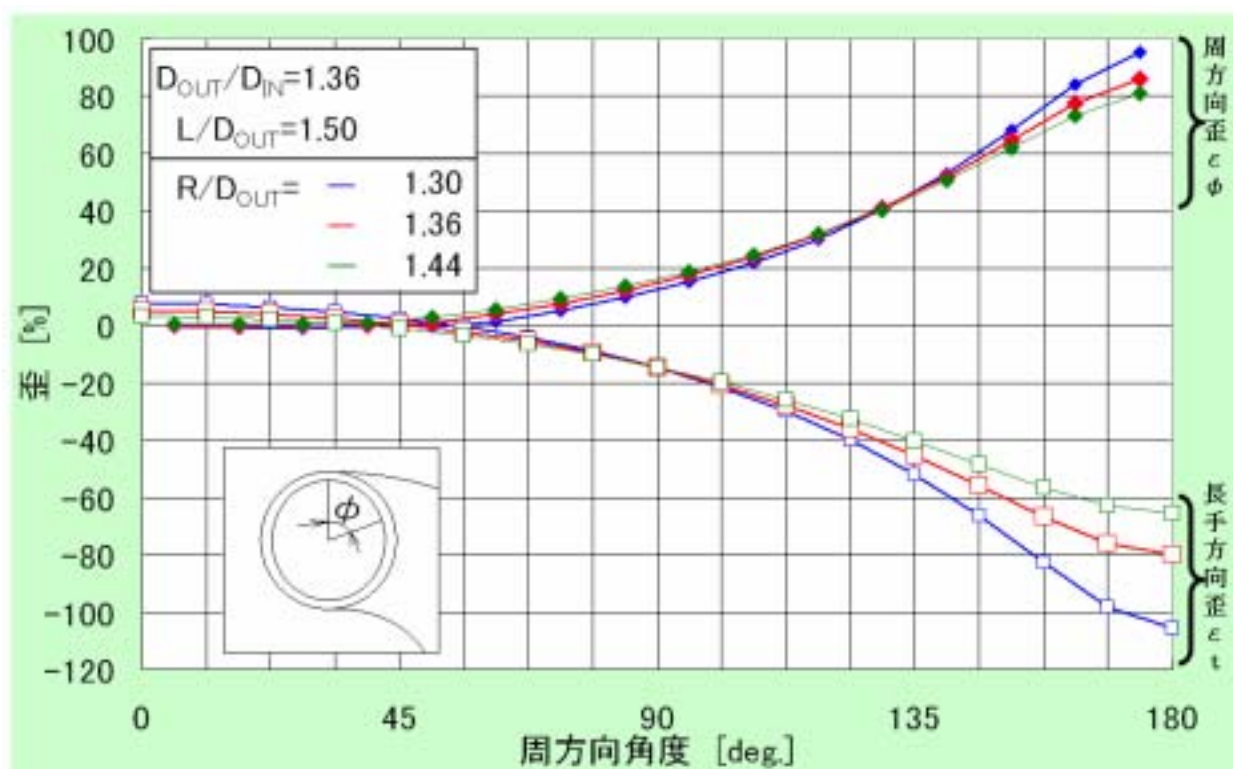
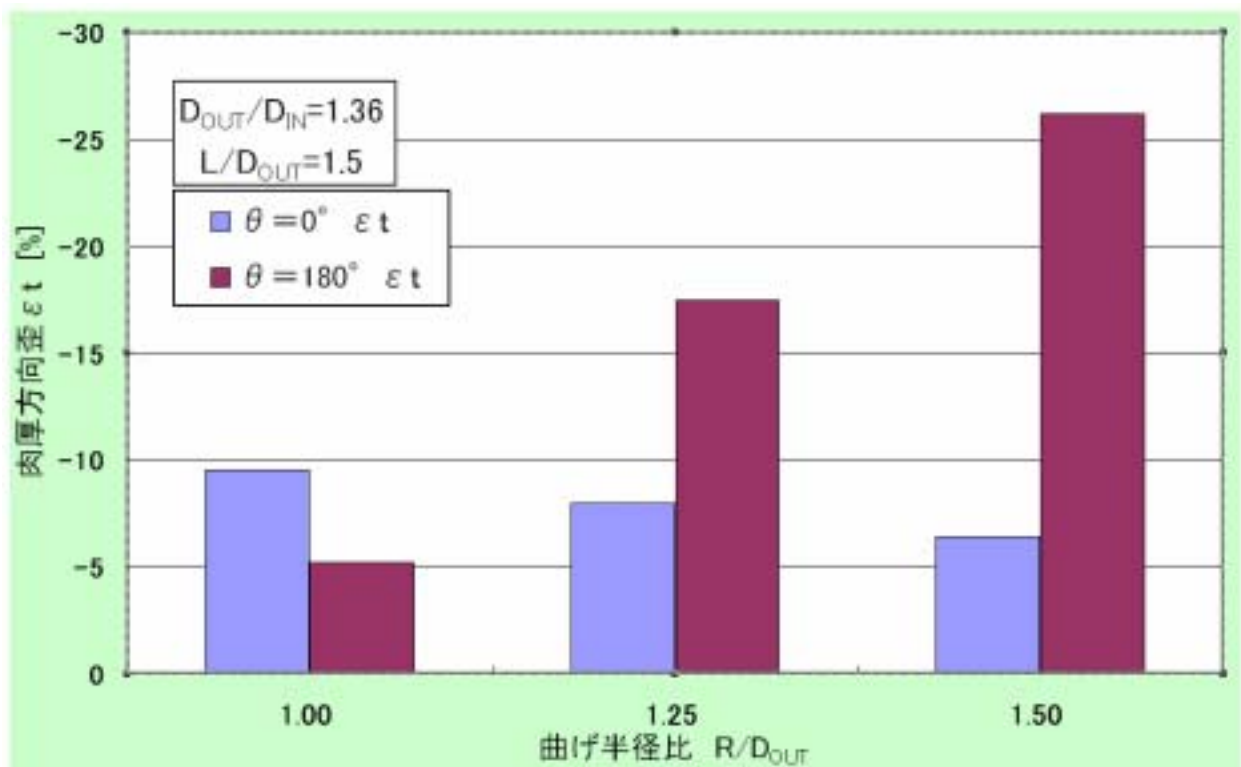


図 3.2 曲げ半径比 R/D_{OUT} と ϵ_θ ・ ϵ_l の関係

曲げ半径比と肉厚方向歪 ε_t の関係を図 3.3 に示す。肉厚方向にかかる外力は小さいため、肉厚方向歪は周方向歪・長手方向歪による影響を大きく受ける。これはマンドレルの形状に関係ない。曲げ半径比が増加するほど曲げ外周部は増肉し曲げ内周部では減肉する。拡管率 = 1.36 のとき、曲げ内周部と曲げ外周部の肉厚が同一になるのは曲げ半径比 1.15 と推定される。



3.3 曲げ半径比 R/D_{OUT} と ε_t の関係

3.3 拡径率 D_{OUT}/D_{IN} が変形挙動に及ぼす影響

No.16・No.19・No.22 より、拡径率 D_{OUT}/D_{IN} と周方向歪 ϕ ・長手方向歪 ϵ の関係を図 3.4 示す。拡径率の変化による長手方向歪への影響は見られなかった。周方向歪においては、拡径率が大きくなるほど曲げ内周部で増加した。拡径率が大きくなると、曲げ内周部において選択的に歪が増加することが明らかになった。

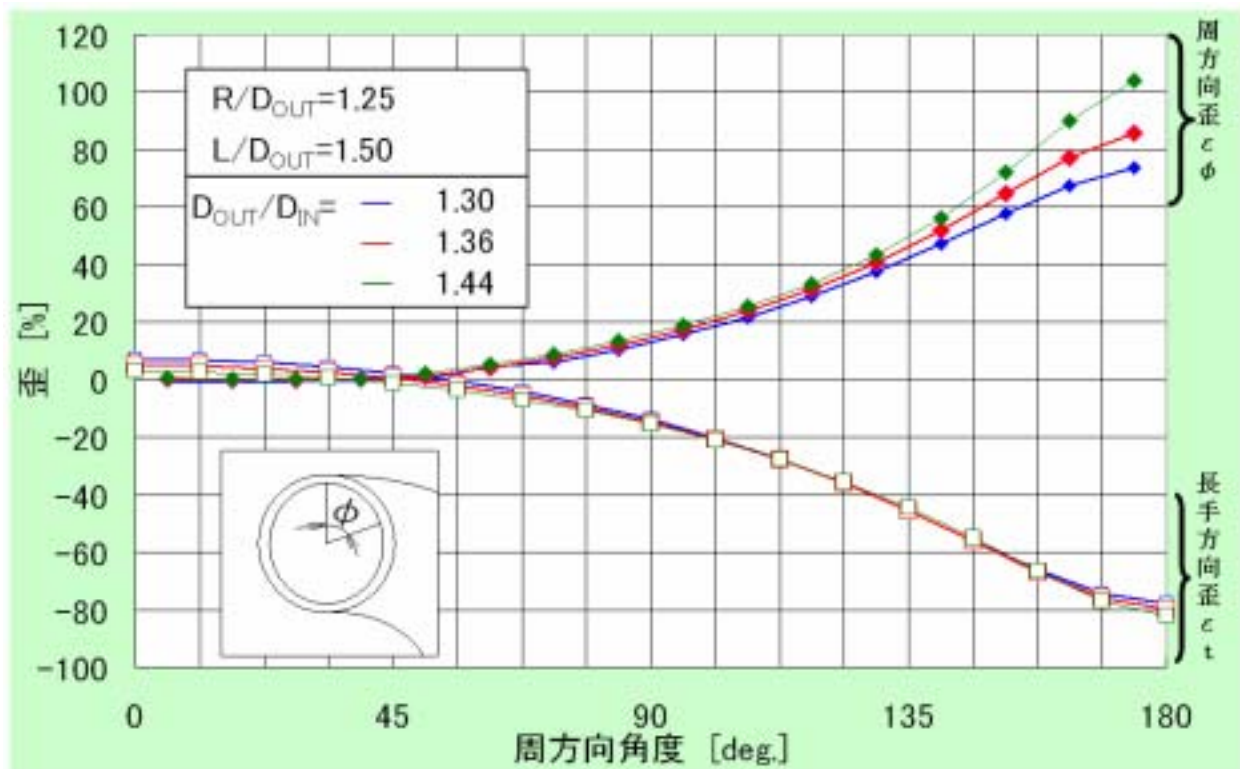


図 3.4 拡径率 D_{OUT}/D_{IN} と ϕ ・ ϵ の関係

拡径率 D_{OUT}/D_{IN} と肉厚歪 t の関係を図 3.5 に示す。拡径率が増加すると曲げ外周部は増肉し、曲げ内周部では減肉する。曲げ内周部の減肉は、周方向の選択的な歪の増加が起因している。曲げ半径 = 1.25 のとき、曲げ内周部と曲げ外周部の肉厚が同一になるのは拡径率 1.33 と推定される。

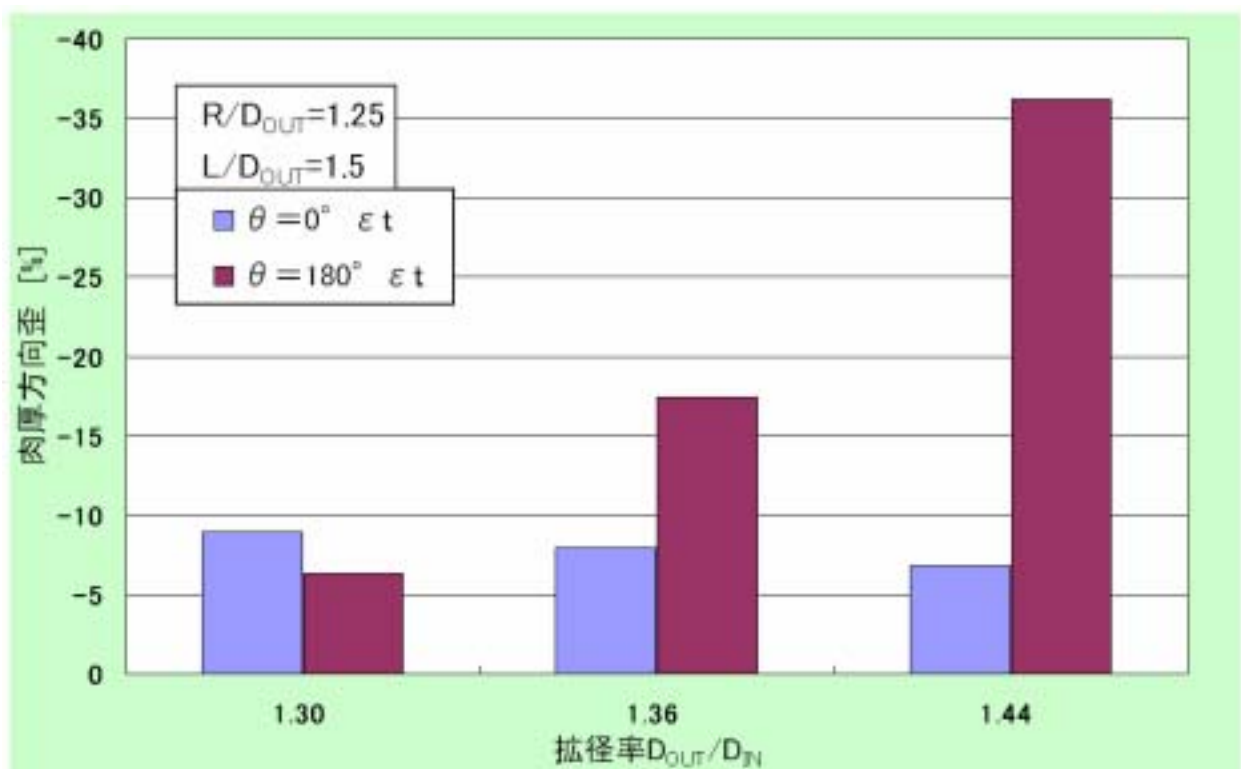


図 3.5 拡径率 D_{OUT}/D_{IN} と t の関係

3.4 拡管部長さ比 L/D_{OUT} が変形挙動に及ぼす影響

No.12・No.21・No.30 より、拡管部長さ比 L/D_{OUT} と周方向歪 ϕ ・長手方向歪 t の関係を図 3.6 示す。肉厚方向歪の関係を図 3.7 に示す。周方向歪・長手方向歪・肉厚方向歪ともに大きな差は見られなかった。

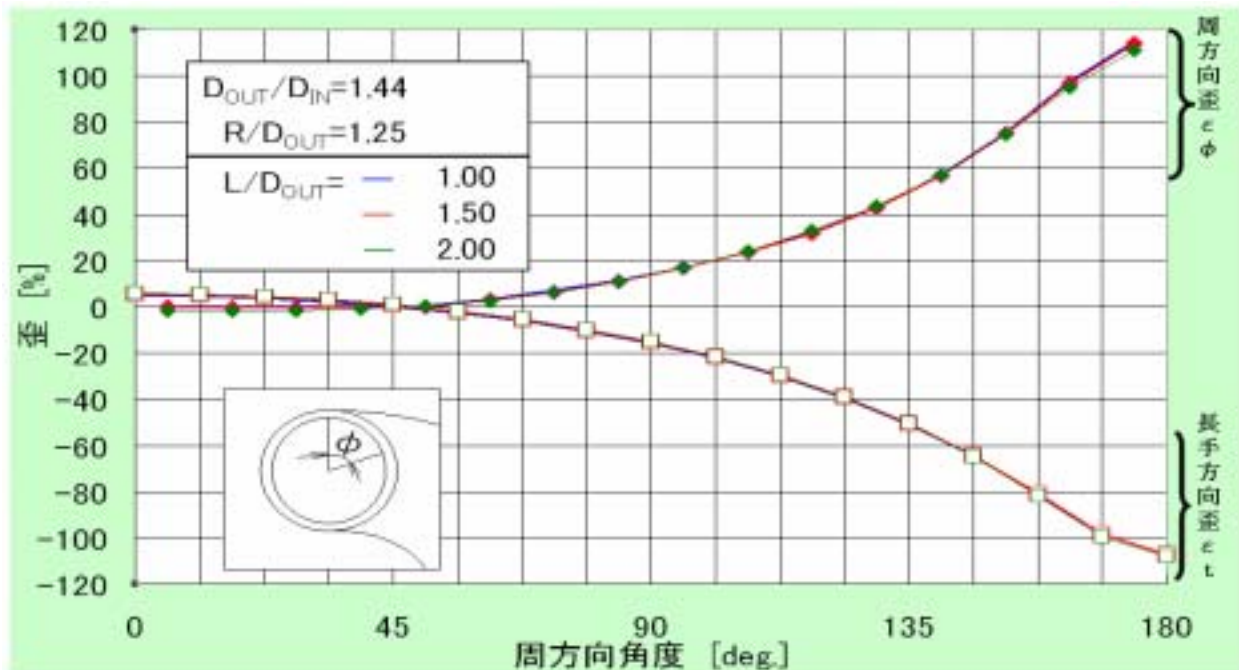


図 3.6 拡管部長さ比 L/D_{OUT} と ϕ ・ t の関係

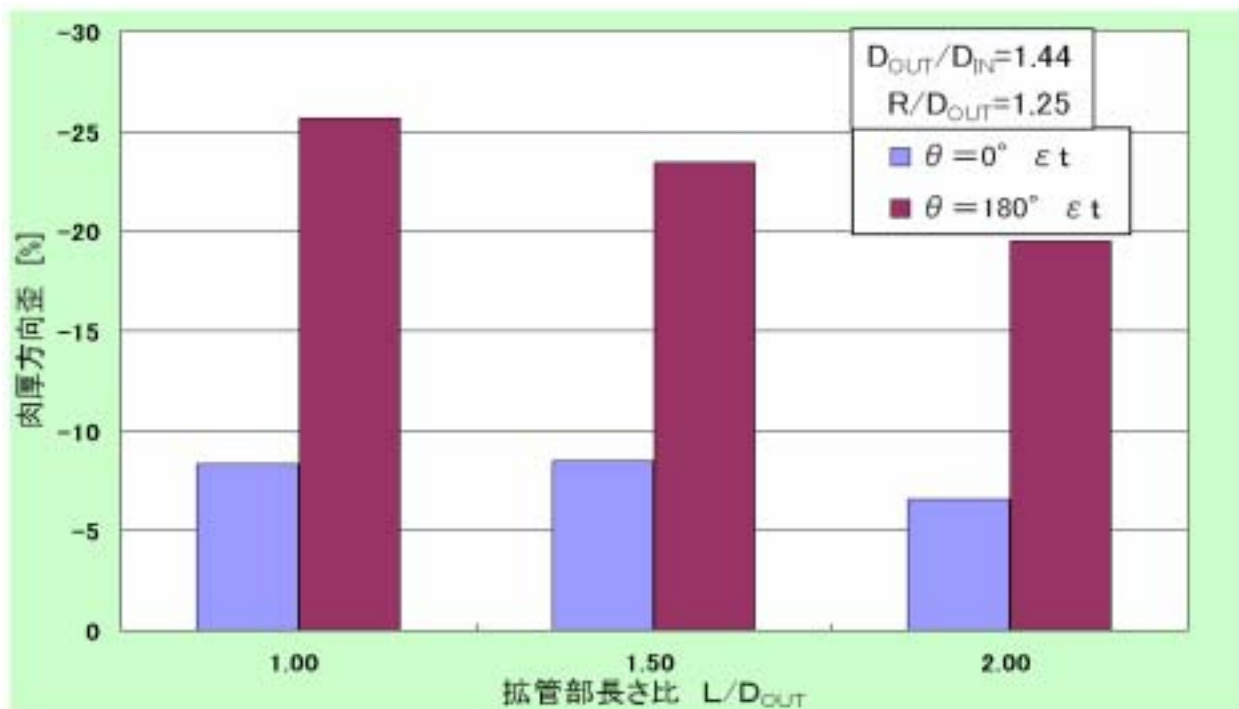


図 3.7 拡管部長さ比 L/D_{OUT} と ϵ_t の関係

3.5 拡管方向比率が変形挙動に及ぼす影響

No.3・No.4・No.5 より、拡管部長さ比 L/D_{OUT} と周方向歪 ϵ_ϕ ・長手方向歪 ϵ_l の関係を図 3.8 示す。長手方向歪 ϵ_l は、拡管方向比率を変え、拡管方向基準軸の位置をマンドレル形状の外部から内部に移動させると、圧縮歪が増加する傾向があることがわかった。また周方向歪では、拡管方向基準軸の位置をマンドレル形状内部へと移動させると、曲げ内周部では大きくなり、曲げ外周部では小さくなる傾向があることがわかった。これらは、拡管方向基準軸を、拡管方向比率 0:100 から 50:50 の位置へ移動させる事によって、拡管方向基準軸からの距離が変化し、その距離に応じて、曲げ外周部は拡管量が増加し、曲げ内周部は減少していると推測される。

また、肉厚方向歪 ϵ_t は、拡管方向比率 0:100,30:70 では曲げ内・外周部 $=0^\circ \cdot 180^\circ$ 共に僅かながら圧縮歪が生じるものの、周方向角度 θ の全域で、ほぼ一定な値となった。それに対し、拡管方向比率 50:50 では、曲げ外周部 $=0^\circ$ において拡管方向比率 0:100 及び 30:70 に比べ、大きな圧縮歪が生じ、周方向角度の増加と共に肉厚方向歪が増加する。そして、この肉厚方向歪は周方向角度 $\theta = 120^\circ$ 付近を境目に減少する。

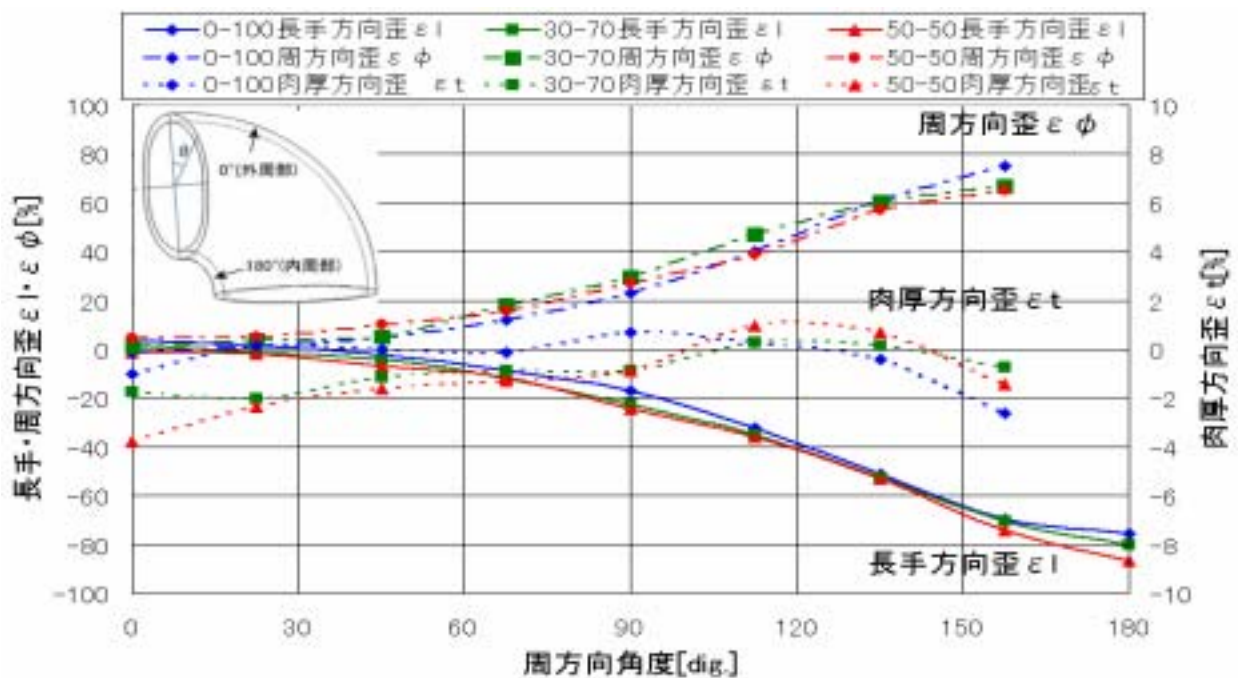


図 3.8 拡径方向比率と各方向歪の関係

拡管方向比率の変化における肉厚歪分布を図 3.9 に示す。拡管方向比率が 0:100 から 50:50 に変化するに従って、曲げ外周部 $\theta = 0^\circ$ では肉厚方向歪は減少し、周方向角度 $\theta = 90^\circ$ においては拡管方向比率に関係なく肉厚方向歪は殆ど変化しない。また、曲げ内周部 $\theta = 180^\circ$ では、拡管方向比率 0:100, 50:50 は肉厚方向歪が減少しているのに対し、拡管方向比率 30:70 においては肉厚方向歪がほぼ 0%となっている。この結果から、拡管方向比率が 30 : 70 の付近で肉厚の均一性が最も高いと考えられる。

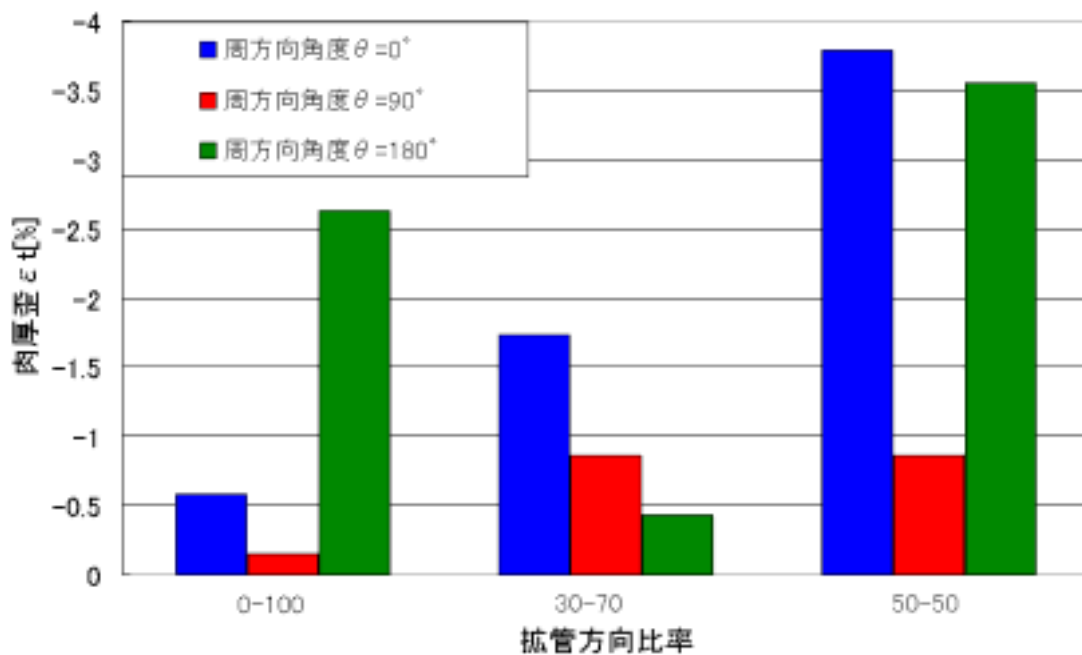


図 3.9 拡管方向比率と肉厚歪の関係

3.6 曲げ半径比 R/D_{OUT} と拡径率 D_{OUT}/D_{IN} が肉厚の均一性に及ぼす影響

3.2-3.5 の考察よりマンドレル形状の違いによる肉厚歪 ϵ は、曲げ半径比・拡管率の影響は大きく、拡管部長さ比・拡径率の影響が小さいことが明らかになった。そこで、外周部肉厚と内周部肉厚が同一になるようなマンドレル形状を解析の結果から推定した。冷間曲げの拡管部長さ比 $L/D_{OUT} = 1.5$ ・拡径方向比率 = 0 : 100 における拡管率と曲げ半径比の関係を図 3.10 に示す。この近似曲線より上方では曲げ外周より曲げ内周の肉厚が薄くなり、下方では曲げ外周より曲げ内周の肉厚が厚くなる。式(1)よりも D_{OUT}/D_{IN} が 0.05 低くなった。

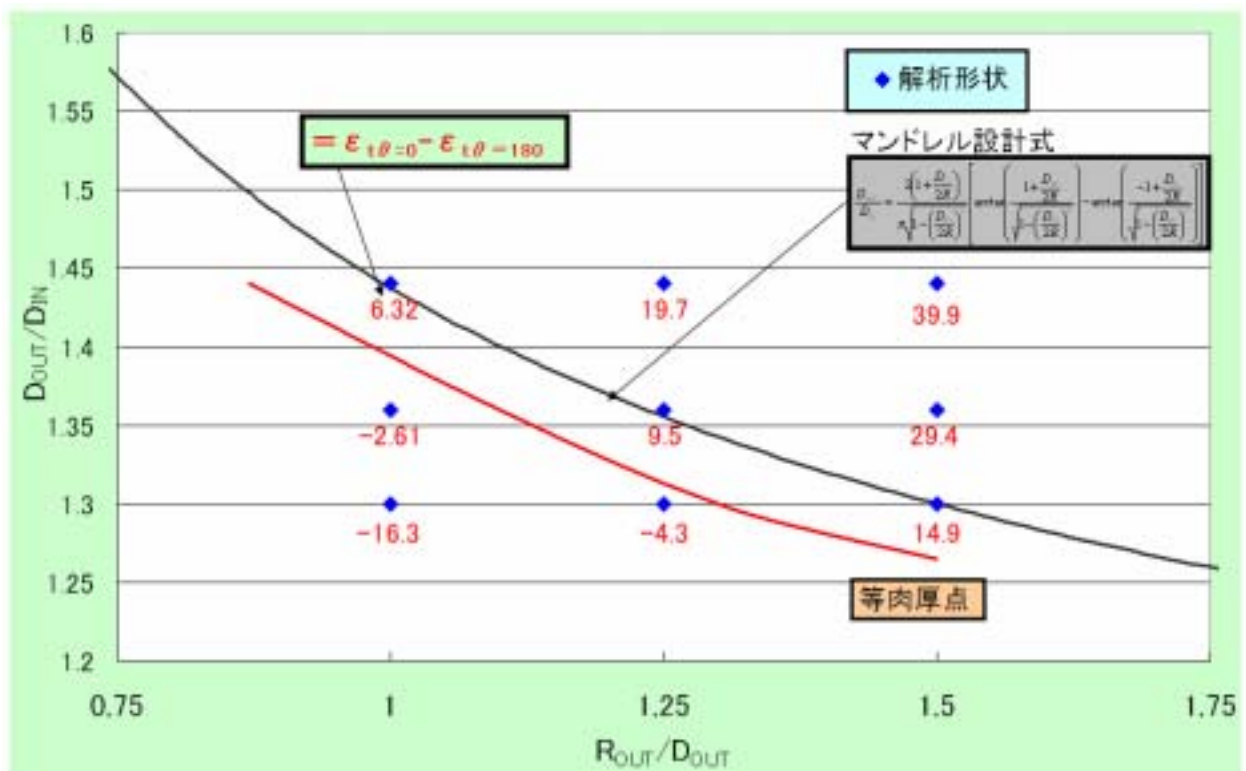


図 3.10 解析における等肉厚設計点

第4章 材料特性が変形挙動に及ぼす影響

これまでの研究でマンドレルの形状が変形挙動に大きく影響を及ぼすことが数値解析・実験の両面から明らかになっている。マンドレル曲げ法は鋼管による熱間加工を行うが、研究では温度分布の影響を考慮する必要のないアルミニウム管による冷間実験を多く行ってきた。そこで、鋼管による熱間実験とアルミニウム管による冷間実験を行い、変形挙動に与える影響を明らかにする。

マンドレル形状は、 $R_{OUT}/D_{OUT} = 1.26$ 、 $D_{OUT}/D_{IN} = 1.42$ 、 $L/D_{OUT} = 2.0$ である。

4.1 荷重への影響

冷間・熱間実験における成形荷重の推移を図4.1に示す。荷重の立ち上がりは冷間・熱間実験ともに同様の傾きを示した。冷間実験では67 mmと112 mmを境に成形荷重が減少している区間がある。これは拡管部曲げ内周において前材が割れたためである。冷間実験荷重は12.8 kN、熱間実験荷重は15.1 kNで定常状態になった。その原因として、大きな変形が起こる曲げ内周部において温度が低く、変形抵抗が大きかったためだと考えられる。

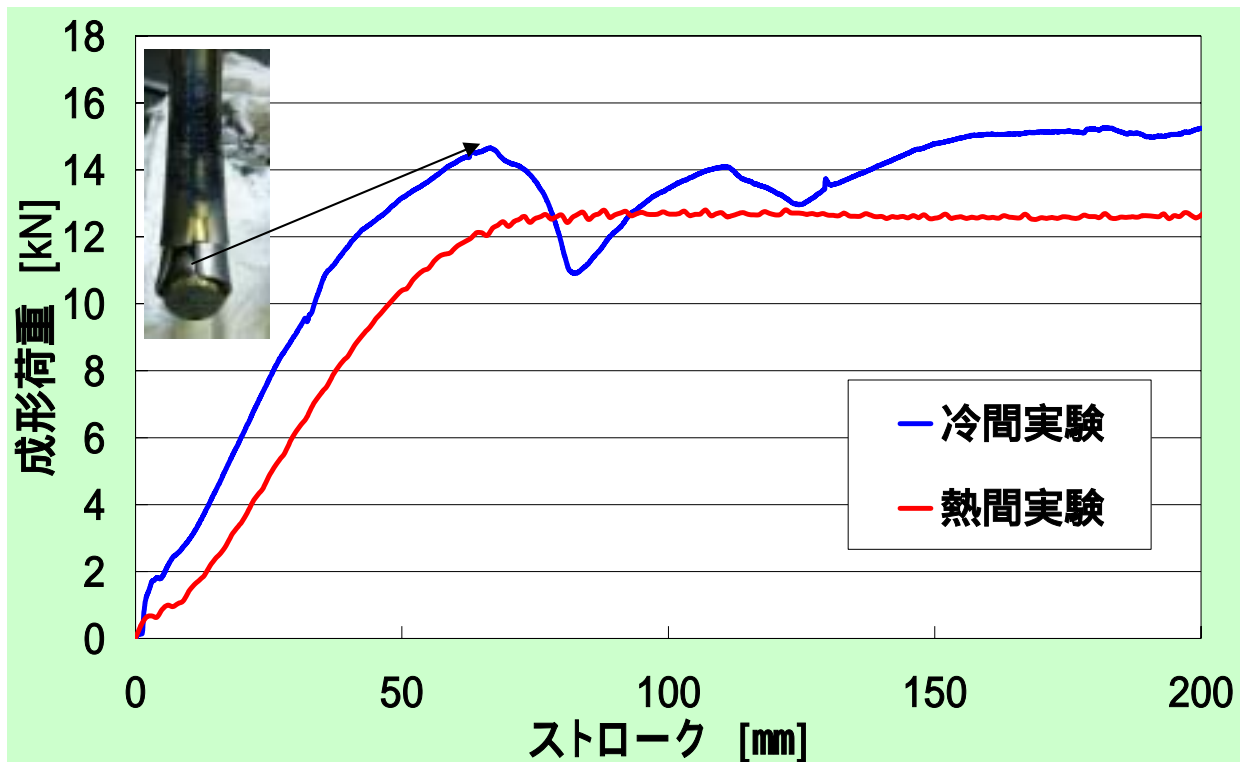


図4.1 実験における成形荷重

4.2 各方向歪への影響

長手方向歪を ϵ_l 、周方向歪を ϵ_c 、肉厚方向歪を ϵ_t と定義する。冷間・熱間解析における成形途中の歪分布を図 4.2 に示す。曲げ外周部における長手方向歪は 0% でほぼ一定となった。これにより、曲げ中立軸が管外表面近傍に存在すると考えられる。曲げ内周部においては拡管部で 90% 程の圧縮歪を生じ、その後一定となった。

熱間実験と冷間実験成形後の製品断面における長手方向歪 ϵ_l 、周方向歪 ϵ_c および肉厚方向歪 ϵ_t の分布を図 4.2 に示す。長手方向では曲げ内周に向かう程大きな圧縮歪を生じ周方向では大きな引張歪を生じた。これは拡管による周方向応力が断面全体に作用するのに対し、曲げによる長手方向応力が曲げ外周部で作用せず、曲げ内周部で最大となるので曲げ内周部で選択的に変形が生じたと考えられる。周方向歪において、曲げ外周部では温度条件の違いによる歪への影響は少ない。曲げ内周部では、冷間実験の歪が減少し続ける一方、熱間実験の歪は 0° 付近で増加する。これは曲げ外周部の温度が高いため歪が大きくなったと考えられる。長手方向歪では、ほぼすべての場所で冷間実験よりも熱間実験の圧縮歪が大きい。これは、常温のアルミニウムと $700 \sim 750^\circ\text{C}$ の鋼管での応力ひずみ線図が異なることに起因しており、冷間実験よりも熱間実験の成形荷重が大きい理由と同様と考えられる。

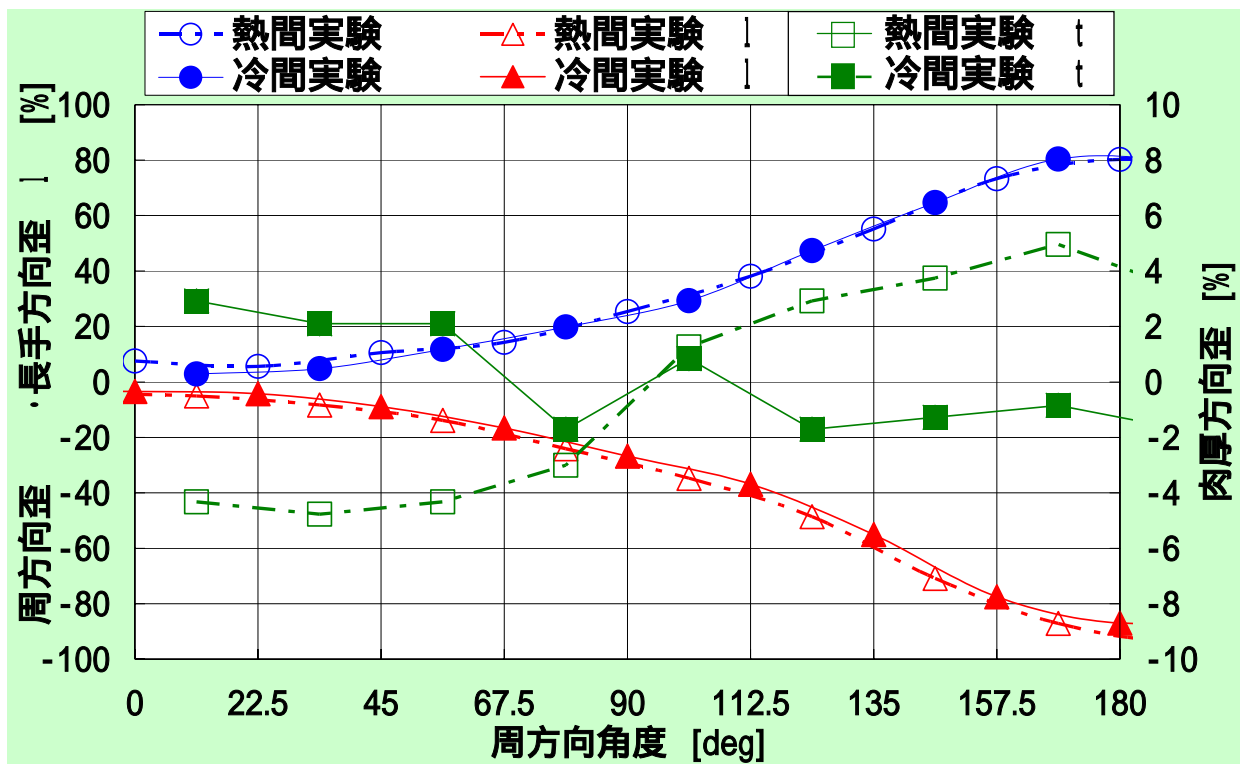


図 4.2 各方向歪分布

肉厚方向歪 t は冷間・熱間実験共に $0 \pm 5\%$ で推移した。冷間実験では曲げ外周部が増肉し曲げ内周部で減肉したのに対し、熱間実験では曲げ外周部が減肉し曲げ内周部で増肉した。曲げ外周部が大きく減肉した原因は、冷間実験に比べ 0° 付近の周方向歪が大きいめである。最大肉厚歪と最小肉厚歪の差は冷間実験が 4.0% 、熱間実験が 9.7% となった。肉厚方向歪は、温度分布により大きく影響を受けることが明らかになった。

4.3 応力分布に及ぼす影響

冷間と熱間解析における Von-Mises の相当応力分布を図 20、図 21 に示す。冷間、熱間共に相当応力は曲げ内周部に近づくほど大きくなり、周方向角度 180 度で最大となっている。これは曲げ内周部において軸方向の圧縮応力最大となり、周方向において引張応力最大となっていることと対応している。熱間では拡管部中央部で最大応力になるのに対し、冷間では拡管部最後部であった。マンドレルの拡管部における径の増加量は sin 曲線をなしている。よって拡管部中央で変形量が最大となり、応力が大きくなる。A1070 は加工硬化しやすい材料であるため、変形量の少なくなる拡管部最後部でも応力が高くなっている。

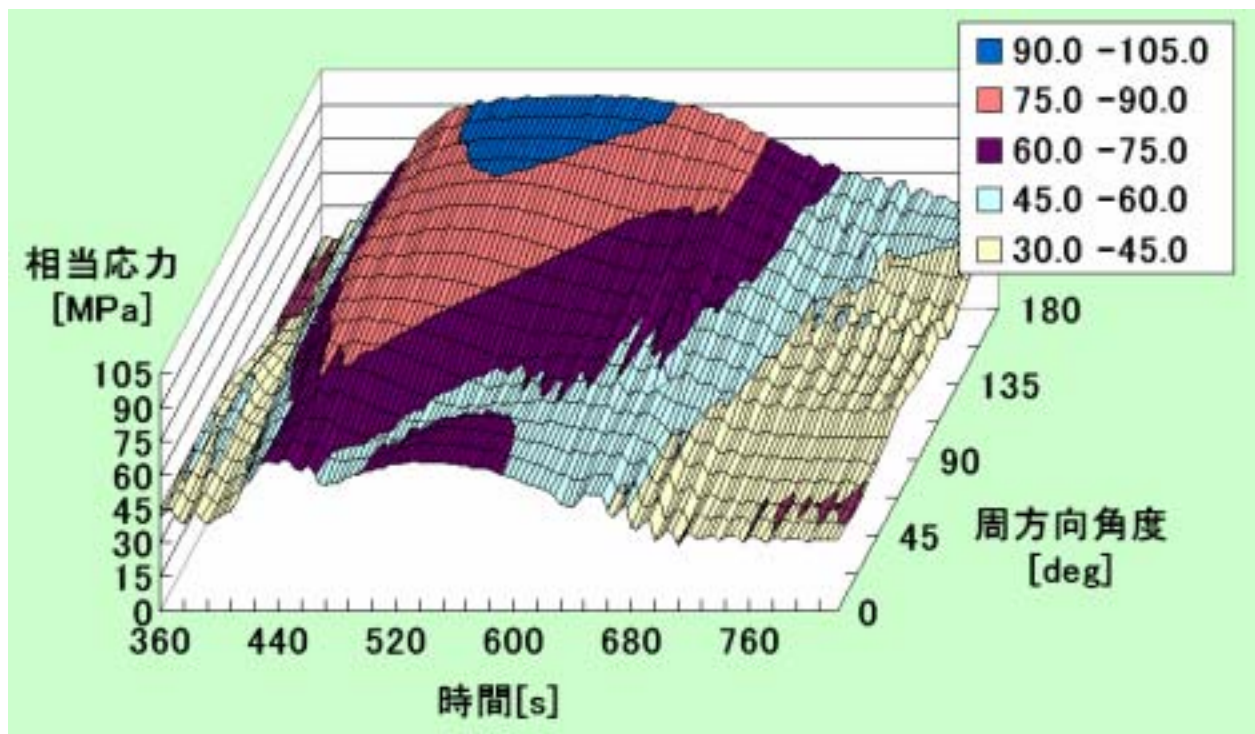


図 4.6 熱間解析における Von_Mises の相当応力

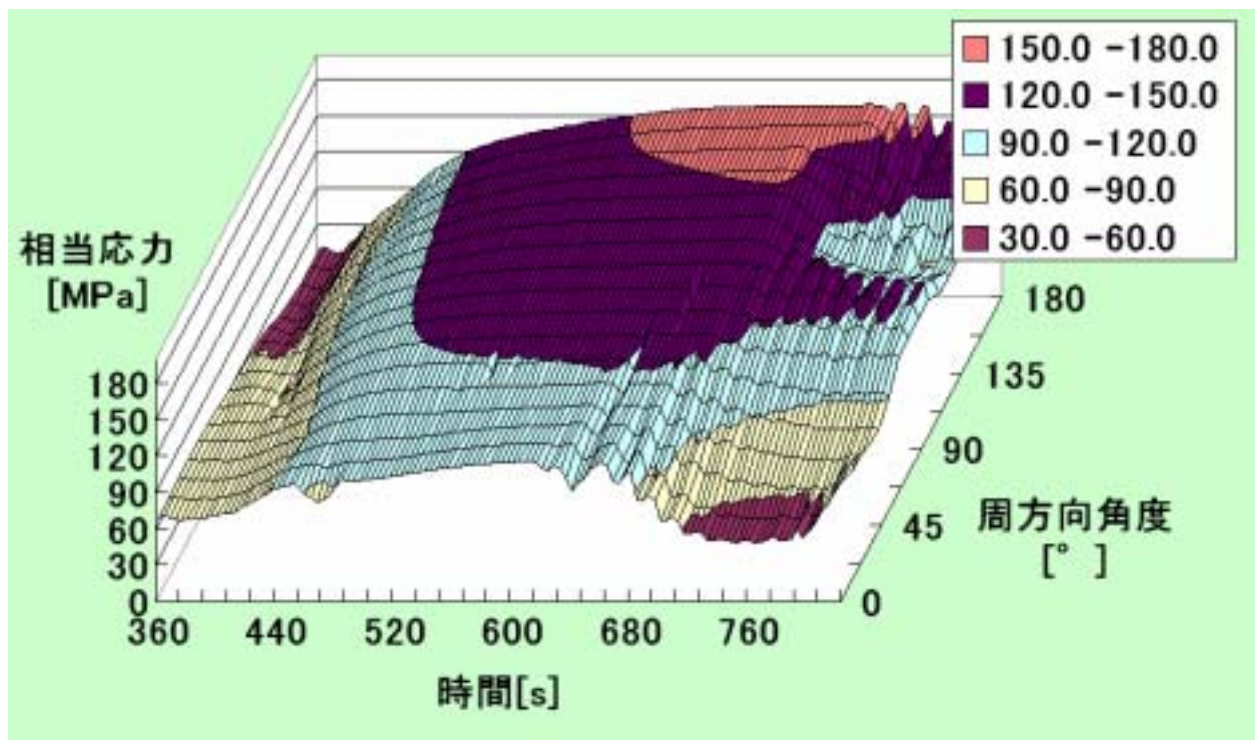


図 4.7 冷間解析における Von_Mises の相当応力

第5章 結論

マンドレル曲げの変形特性は実験と数値解析により、以下ことが明らかになった。

- (1) 曲げ半径比 R/D_{OUT} が大きくなると、周方向歪・長手方向歪共に曲げ外周で減少し、曲げ内周で増加する。肉厚方向歪は曲げ内周部で減少する。成形荷重は減少する。
- (2) 拡管率 D_{OUT}/D_{IN} が大きくなると周方向歪は曲げ内周で増加し、肉厚方向歪は曲げ内周で減少する。成形荷重は増加する。
- (3) 成形長さ比 L/D_{OUT} が変化しても周方向歪・長手方向歪への影響は少ない。肉厚方向歪も同様である。成形荷重は増加する。
- (4) 拡径方向比率は、0:100・30:70・50:50 の順に長手方向歪が増加し、周方向歪は内周部で減少・外周部で増加する。
- (5) マンドレル形状の設計式・解析モデルを提案した。設計式は実験や数値解析によりマンドレル設計の基本的な考え方として使用できることを示した。
- (6) 冷間実験に比べ熱間実験では、長手方向歪はすべての場所で増加し、周方向歪は曲げ外周部で増加する。肉厚方向歪は曲げ外周部で減少、曲げ内周部で増加する。成形荷重は減少する。

参考文献

- 1)高木裕，直井久，栗田孝：マンドレル曲げにおける鋼管とアルミニウム管の変形挙動について，第 58 回塑性加工連合講演会講演論文集，pp561-562，2007
- 2)津川奈生，張淳泰，直井久，栗田孝：熱間マンドレル曲げにおけるマンドレル形状寸法の検討（第一報），第 57 回塑性加工連合講演会講演論文集，pp67-78，2006
- 3)保住昭宏，張淳泰，直井久，栗田孝：熱間マンドレル曲げにおけるマンドレル形状・寸法が変形挙動に及ぼす影響，第 56 回塑性加工連合講演会講演論文集，pp667-668，2005
- 4)川西総詞，張淳泰，直井久，坂井裕美，栗田孝：熱間マンドレル曲げにおけるマンドレル形状の検討，第 55 回塑性加工連合講演会講演論文集，pp95-96，2004

謝辞

本研究及び論文作成にあたり御指導、御鞭撻を賜った法政大学 直井久教授に深く感謝の意を申し上げます。

研究遂行にあたり、様々な御協力、御助言を頂いた淡路産業株式会社 丸山様・栗田様・坂井様・山川様、新日鉄ソリューションズ株式会社 西様に心から感謝の意を申し上げます。

実験に用いた材料の加工に御協力頂いた元法政大学 小山様、末長様、松波様、富田様、島貫様、石井様に心から御礼申し上げます。