

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「プラント配管用ベンド管の減肉しない曲げ加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 タマティーエルオー株式会社

## 目 次

|      |                                |    |
|------|--------------------------------|----|
| 第1章  | 研究開発の概要                        |    |
| 1.1) | 研究開発の背景・研究目的および目標              | 1  |
| 1.2) | 研究体制                           | 3  |
| 1.3) | 成果概要                           | 7  |
| 1.4) | 当該研究の連絡窓口                      | 8  |
| 1.5) | 活動状況（研究開発委員会、幹事会               |    |
| 第2章  | 新機構を導入した曲げ加工装置の設計および製作（責任者：佐藤） |    |
| 2.1) | はじめに                           | 9  |
| 2.2) | 従来技術                           | 9  |
| 2.3) | 新機構の原理および構造                    | 13 |
| 2.4) | 曲げ加工装置の技術目標値および評価結果            | 18 |
| 2.5) | まとめ                            | 27 |
| 第3章  | 予備評価およびシミュレーション                |    |
| 3.1) | はじめに                           | 28 |
| 3.2) | バランス曲げ理論の実証実験                  | 28 |
| 3.3) | 曲げシミュレーション                     | 33 |
| 3.4) | まとめ                            | 35 |
| 第4章  | 4インチ鋼管の曲げ実験                    |    |
| 4.1) | はじめに                           | 37 |
| 4.2) | 曲げ加工実験計画                       | 37 |
| 4.3) | 技術目標値および評価方法                   | 37 |
| 4.4) | 評価結果                           | 39 |
| 4.5) | まとめ                            | 44 |
| 第5章  | 総合調査結果                         |    |
| 5.1) | 期待される市場動向                      | 46 |
| 5.2) | 事業展開に向けた今後の課題                  | 49 |

## 第1章：研究開発の概要

### 1.1) 研究開発の背景・研究目的および目標

#### 1) 研究開発の背景

石油化学や火力発電プラント、あるいは原子力プラント等の配管プラントは、膨大な数の「エルボ」と「直管」を溶接して建設されている。しかしながら、溶接箇所の増大は、信頼性に大きく影響するだけでなく建設工期を長くし、結果的に建設コストを増大するという問題を抱えている。また、溶接箇所を減らし信頼性を向上させるためのキーパーツとして用いられる「ベンド管」も若干の問題を抱えている。

即ち、現在の加工技術におけるベンド管は高周波加熱技術を用いて製作されるが、曲げ部外側の肉厚が減少するという、いわゆる「減肉」の問題を抱えており、耐食摩耗や減肉問題がシステムの信頼性に致命的となる原子力プラントなどにおいては大きな問題となる可能性がある。

従って、減肉の影響を一定のレベルに抑えるために肉厚が一ランク上の鋼管を使用する、あるいは、減肉のレベルを一定の範囲に抑えるために曲げ半径を大きくするなどの対応が必要となり、配管材料が増加して材料コストが増加する、あるいは、配管をコンパクトにまとめられないといった問題である。

#### 2) 研究開発の目的

本研究開発は、曲げ外側の肉厚減少を最小限に抑制、もしくは増肉しながら曲げ加工を行う技術と加工設備を開発し、その成果を「エルボ」と「直管」に置き換えることにより溶接作業を大幅に削減し、プラント建設にかかる信頼性の向上と工期の短縮およびコストの大幅な削減に寄与することを目的とする。

また、本研究開発における曲げ加工技術は、前述のように曲げ部外側の肉厚の増加も可能である。腐食摩耗や減肉問題が致命傷となる原子力プラントなど、極めて厳しい使用環境にも対応可能な「ベンド管」を提供可能とし、新たな市場への展開も目指す。

特に原子力プラントでは、配管の腐食磨耗による減肉は致命的な事故の元となり得る。曲げ半径の小さい曲がり部では、高速流体による激しい腐食磨耗・減肉が生じやすいため、定期的に肉厚測定を行い規定の肉厚が確保できていることを確認しており、その検査費用がコスト増の原因となっている。穴が開くのは論外であるが、減肉は耐震強度劣化にも繋がるので深刻な問題である。

従って、厳しい条件の原子力のみならず、減肉が生じない、望ましくは増肉する曲げ加工法が開発され、提供されることが望まれていた。

本開発研究は、本研究開発メンバーの一員である工学院大学のこれまでの研究成果と、実験機を用いて得られた知見を元に、さらに大口径の鋼管の曲げ加工を実現するための課題解決に向けて考案された軸圧縮機構を盛り込み、より大口径の鋼管にまで対応可能な曲げ加工装置を設計製作し、今年度においては、前記軸圧縮機構部の性能評価と、4インチ鋼管を対象に曲げ加工実験を行い、肉厚制御を中心とした曲げ加工機の基本性能と、現在の「配管用継ぎ手」を代替しうる性能の「ベンド管」が実現しうることを実証する。

さらに、次年度以降においては、今回製作した曲げ加工装置を用い、より大口径の鋼管

を用いた曲げ加工評価を進め JIS 規格に定める  $\Phi 21.8\text{mm}$  から  $\Phi 216.3\text{mm}$  の「配管用継ぎ手」に代替しうる「バンド管」の製造技術を確立することを目指す。

### 3) 目標

#### (1) 曲げ加工装置における技術目標値

本事業の最終目標である鋼管の「減肉防止曲げ加工」を実現する上で、曲げ加工装置の低速送り時の安定性が重要な要件となる。また、曲げ加工装置の生産性の観点からは、高速送りも必要となる。

そこで、本実施内容における技術目標として、軸圧縮機構部の制御性能に関し次に掲げる数値の実現を目指す。

##### 〈目標値〉

- ・送り速度制御範囲       :       0～300mm/min
- ・送り速度安定度         :       送り速度 10mm/min にて  $\pm 10\%$ 以下

#### (2) 曲げ加工実験における技術目標値

上記により完成した「曲げ加工装置」を用いて、4 インチの鋼管を対象とした曲げ加工実験を行い、バンド管としての基本性能の評価を進める。

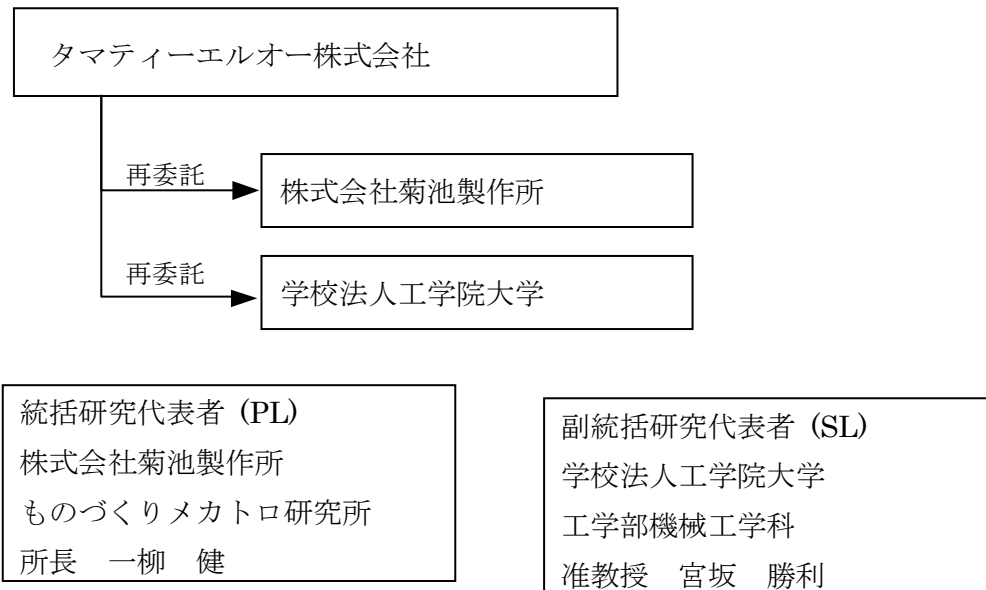
本曲げ加工実験では、現状における「配管用継ぎ手」を代替しうる性能の「バンド管」を実現することの目標に、次に掲げる数値目標の実現を目指す。

##### 〈技術目標値〉

- ・寸法精度:               JIS 規格に定める「配管用継ぎ手」の寸法精度の実現
- ・曲部増肉;              曲げ部外側の管厚み( $t_i$ )が、曲げ前の管厚( $t_0$ ) 以上を確保できる

## 1.2) 研究体制

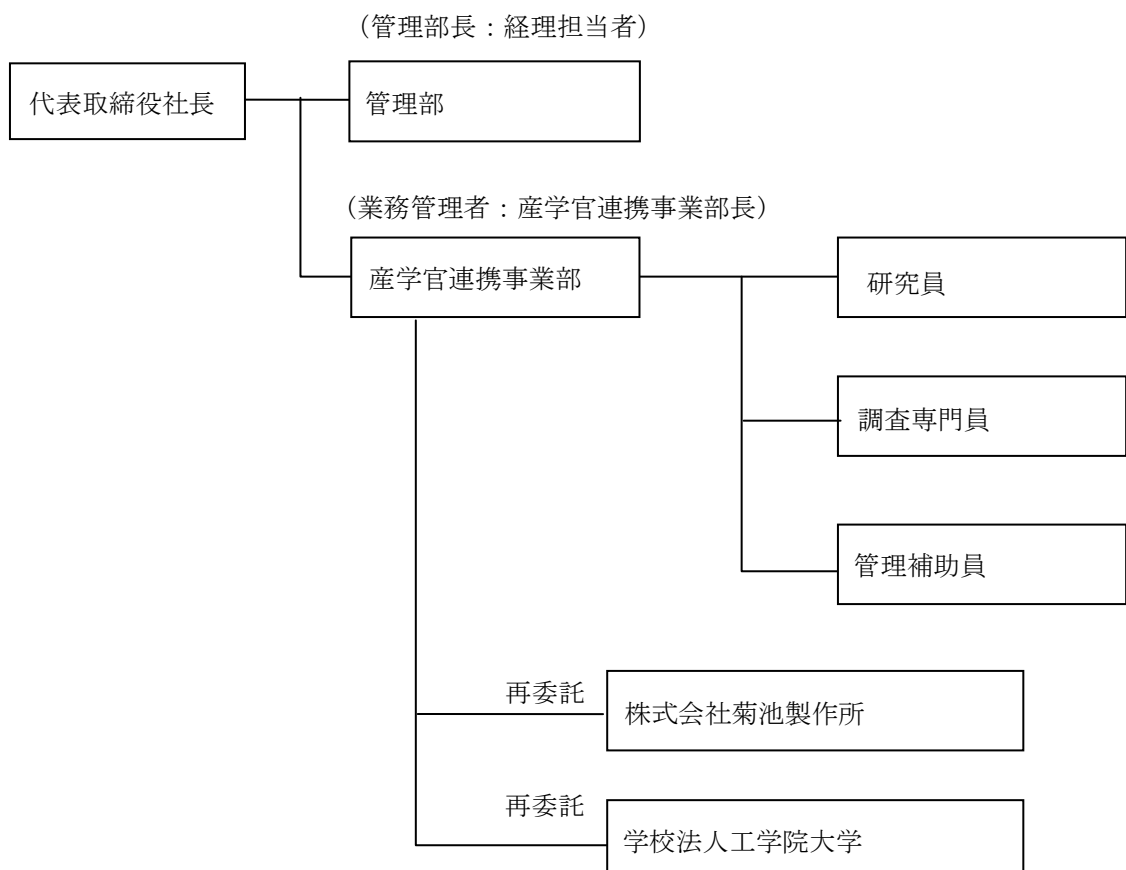
### 1) 研究組織



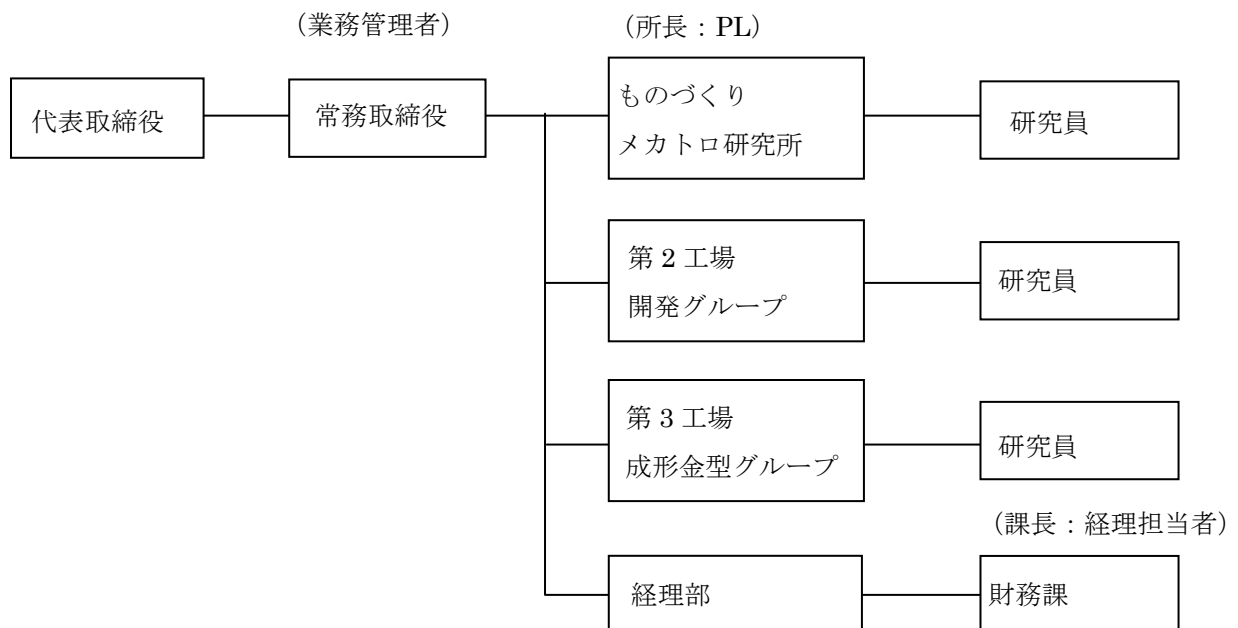
### 2) 管理体制

#### (1) 事業管理者

#### 【タマティーエルオー株式会社】



【株式会社菊池製作所】



```

graph LR
    A[理事長] --- B[学長]
    B --- C[工学部]
    B --- D[総合研究所]
    C --- E[機械工学科]
    D --- F[研究推進課]

```

（准教授:SL）

（業務管理者）

（経理担当者）

【事業管理者】

① 研究員

| 氏名   | 所属・役職        | 実施内容（番号） |
|------|--------------|----------|
| 佐藤 徹 | 産学官連携事業部 研究員 | ① ②      |
|      |              |          |

| 氏名      | 所属・役職          | 実施内容（番号） |
|---------|----------------|----------|
| 壬生 捷利   | 産学官連携事業部 調査専門員 | ③        |
| 管理補助員 A | 産学官連携事業部 部員    | ③        |

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  |  |
|--|--|--|

【再委託先】

(1) 株式会社菊池製作所

① 研究員

| 氏名    | 所属・役職           | 実施内容（番号） |
|-------|-----------------|----------|
| 一柳 健  | ものづくりメカトロ研究所 所長 | ① ②      |
| 斎藤 秀伸 | ものづくりメカトロ研究所    | ① ②      |
| 石倉 優  | 同上              | ① ②      |
| 八戸 琢  | 第2工場 開発グループ     | ①        |
| 森 佳文  | 同上              | ① ②      |
| 吉田 隆太 | 同上              | ① ②      |
| 荒川 宗行 | 第3工場 成形金型グループ   | ① ②      |
| 田村 幸輔 | 同上              | ① ②      |
|       |                 |          |

(2) 学校法人工学院大学

① 研究員

| 氏名    | 所属・役職       | 実施内容（番号） |
|-------|-------------|----------|
| 宮坂 勝利 | 工学部機械工学科准教授 | ① ②      |

4) 経理担当者および業務管理者

【事業管理者】

(1) タマティーエルオー株式会社

|       |           |       |
|-------|-----------|-------|
| 経理担当者 | 管理部長      | 吉野 正喜 |
| 業務管理者 | 産学官連携事業部長 | 山県 通昭 |

【再委託先】

(1) 株式会社菊池製作所

|       |         |       |
|-------|---------|-------|
| 経理担当者 | 総務部 財務課 | 内田 光  |
| 業務管理者 | 常務取締役   | 齋藤 弘己 |

(2) 学校法人工学院大学

|       |             |       |
|-------|-------------|-------|
| 経理担当者 | 総合研究所 研究推進課 | 酒井 智晴 |
| 業務管理者 | 総合研究所 事務次長  | 小山 和幸 |

5) 他からの指導・協力者

【開発推進委員会】

| 氏名    | 所属・役職                         | 備考                |
|-------|-------------------------------|-------------------|
| 一柳 健  | 株式会社菊池製作所 ものづくりメカトロ研究所長       | 委 PL              |
| 宮坂 勝利 | 学校法人工学院大学 機械工学科准教授            | SL                |
| 齋藤 弘己 | 株式会社菊池製作所 常務取締役               |                   |
| 八戸 琢  | 株式会社菊池製作所 ものづくりメカトロ研究所員       | 委                 |
| 井深 丹  | タマティーエルオー株式会社 代表取締役社長         |                   |
| 佐藤 徹  | タマティーエルオー株式会社 産学官連携事業部        | 委                 |
| 壬生 捷利 | 同上                            | 委                 |
| 富野 啓介 | (株)日立エンジニアリングアンドサービス<br>たら崎工場 | アドバイザー<br>(謝金、旅費) |
| 好永 俊昭 | (元)日立製作所 原子力プラント設計部           | 同上                |
| 蛭田 三郎 | 千代田化工建設株式会社 空間設計部             | 同上                |

### 1.3) 成果概要

#### 1.3.1) 成果

##### 1) 成果 1

4 インチ鋼管の曲げ加工が可能な「曲げ加工装置」の設計および製作を完了し、「曲げ加工実験」を実施することができた。

##### 2) 成果 2

繰り出しジャッキ (G ジャッキ)の最大送り速度を 400mm/min 迄可変可能であり、技術目標値として定めた「最大送り速度：300mm/min」を達成できた。

##### 3) 成果 3

曲げ加工実験をとおして、新機構を採用した「曲げ加工装置」の肉厚制御理論の正しさが実証できた。

##### 4) 成果 4

技術目標値に掲げた「管外側曲げ部」の増肉を実現できた。

#### 1.3.2) 課題

##### 1) 課題 1

技術目標値として定めた「10mm/min における速度安定度 $\pm 10\%$ 」を満足できなかった。原因は、速度指令にかかる位置分解能を 0.1mm としたことによる。

リニアセンサ部の設定分解能と制御分解能の最適化が今後の課題である。

##### 2) 課題 2

今回試作した「曲げ加工装置」は、新しい曲げ理論の実証を目的としたこともあって、パイプの制御、引き出し、加熱コイルの調芯（位置合わせ）等、ほとんどが人力に頼った設計となっている。実験の精度、再現性を高めるためにも、メカ部の手直しや、重要部分の自動化が今後の課題となる。

##### 3) 課題 3

今回の曲げ加工実験をとおして、管外側曲り部の肉厚変化率のバラツキが大きいこと、また、曲げ加工条件によって管内側にしわが発生することがわかった。

管外側の曲り部全域にわたる安定的な増肉と、管内側のしわのない加工を実現するための最適加工条件の探索が今後の課題となる。

##### 4) 課題 4

本事業の成果を生かす市場として期待される「原子力プラント」においては、品質要件の厳しい環境においては「ステンレス管」が用いられている。また、今回実験した 4 インチより大口径の鋼管も用いられている。

ステンレス材料に対する最適曲げ加工条件の探索やより大口径の鋼管に対する曲げ加工実験も今後の課題となる。

##### 5) 課題 5

今回の曲げ加工実験は、「エルボ管の曲げ規格」に従い、曲げ半径 1.33DR という厳しい条件で実施したが、通常用いられている「曲げ管」の曲げ半径が 1.5DR である。市場ニーズに対応可能な要求品質と生産性やコストとのバランスの面から

も、曲げ半径を 1.5～2DR としたときの品質および生産性の比較評価も今度の課題である。

#### 1.4) 当該研究開発の連絡窓口

タマティーエルオー株式会社 第 2 オフィス

東京都羽村子市羽東 1 丁目 14 番 11 号 西部信用金庫 羽村ビル 2 階

担当者 山県 通昭

電 話 042-570-7240

FAX 042-570-7241

E-Mail yamagata@tama-tlo.com

#### 1.5) 活動状況

##### 1) 研究開発委員会

| 日時         | 名称             | 開催場所             |
|------------|----------------|------------------|
| 2009.11.13 | 第 1 回研究開発推進委員会 | 八王子 TC ビル 5 階会議室 |
| 2009.12.14 | 第 2 回研究開発推進委員会 | 同上               |
| 2010.01.18 | 第 3 回研究開発推進委員会 | 株式会社菊池製作所        |
| 2010.02.16 | 第 4 回研究開発推進委員会 | 株式会社菊池製作所        |
| 2010.03.11 | 第 5 回研究開発推進委員会 | 八王子 TC ビル 5 階会議室 |

##### 2) 幹事会

| 日時         | 名称       | 開催場所             |
|------------|----------|------------------|
| 2009.11.20 | 第 1 回幹事会 | 八王子 TC ビル 5 階会議室 |
| 2009.12.11 | 第 2 回幹事会 | 同上               |

## 第2章 新機構を導入した曲げ加工装置の設計および製作

### 2.1) はじめに

石油・化学・発電プラント配管は直管部および曲がり部そして分岐部・縮径部で構成されている。直管部以外は一般に配管継手部と称し、直管部と同等の品質水準を要求されている。配管継手の中でも曲がり部は最も数量の多い品種であり、曲がり部にはエルボおよび高周波曲げ管が用いられている。

エルボの寸法諸元は JIS 規格 ASME 規格 DIN 規格により定められ、共通化された国際標準となっている。

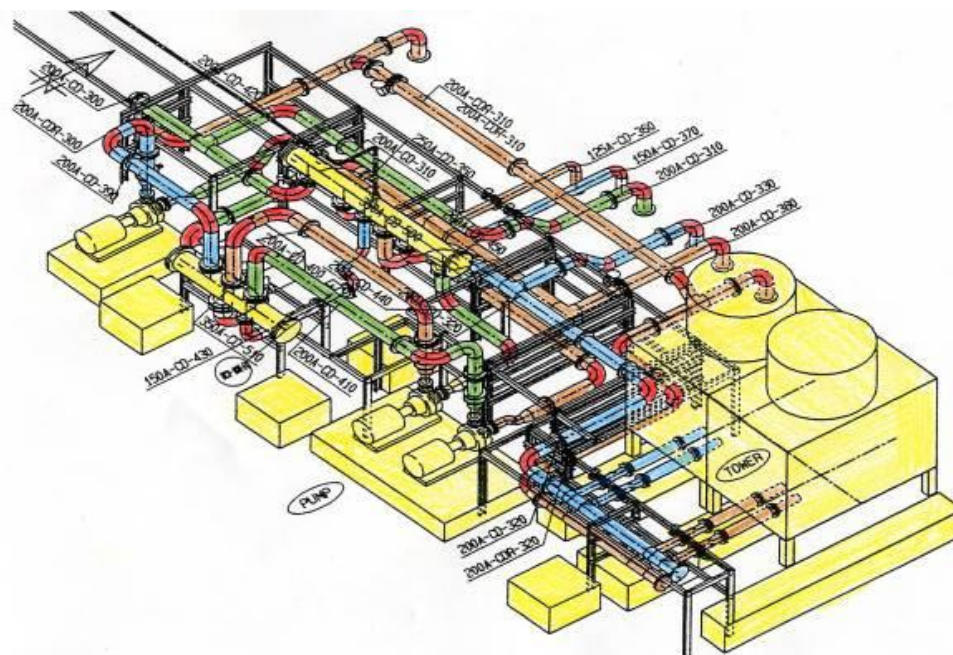


図 2.1.1 プラント配管の一例

上に示した図はプラント配管の一例で多くの曲がり部により構成されていることが分かる。本研究は、プラント配管の曲がり部に用いられている高周波曲げ管について、永年の課題であった曲げ加工時の肉厚減少を抑制するものである。

### 2.2) 従来技術

#### 2.2.1) エルボ

鋼管を炉内で加熱し「マンドレル」に鋼管を差し込んで鋼管の後方から押し出す。

マンドレルはその外径が徐々に太くなるように製作されているから、鋼管も拡張されながら曲がる。理想的な条件で曲げると均等な肉厚分布となり、スループットも高く大量生産に適しているのでエルボの製法としては主流である。しかしながら、拡張して成形するためにその素管は規格外の特種外径・肉厚の鋼管でなければならない。またエルボの外径・肉厚ごとにマンドレルを用意しなければならないという欠点を有する。

図 2.2.1 にエルボの製作方法を示す。

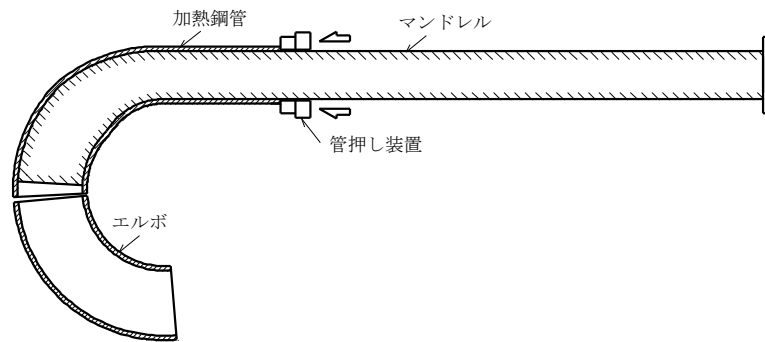


図 2.2.1 エルボの製作方法

### 2.2.2) 高周波曲げ

1960 年代のほぼ同時期に、我が国では第一高周波工業(株)が、そして海外では Cojafex 社（現在は Show グループ所属）が、高周波誘導加熱技術を用いて鋼管を加熱して曲げ加工を行う、いわゆる「高周波曲げ」を開発した。

この方法は長さ 12m あるいは 5.5m の定尺鋼管の任意の箇所を曲げることができるので「エルボ」を用いて鋼管と溶接していた配管工法に比べて溶接箇所の削減に大きな効果がある。溶接箇所の削減によるメリットは、とりわけ厳しい溶接部の品質管理を行うプラント配管工事や発電所配管工事に顕著な効果を発揮している。曲がり管と直管とは溶接によって接続するのであるが、その溶接部は放射線透過試験・超音波探傷試験・染色浸透探傷試験・磁粉探傷試験などより厳重に品質検査され記録し文書保管されなければならないので品質管理コストが大きい。また、配管溶接は高度な技量を有する溶接士を必要とするのであるが、プラント建設工事は世界的規模で一斉に建設が立ち上がることがあるので高度な技量をもつ溶接士が払底するという事態にもなるから、溶接士不足と溶接コスト高という二方面からの圧力が発生し、プラント建設担当者は納期管理とコスト管理に苦しめられている。そのため、溶接箇所数の削減は納期とコストの両面で必要なのである。

図 2.2.2 に高周波曲げ装置の一例を示す。

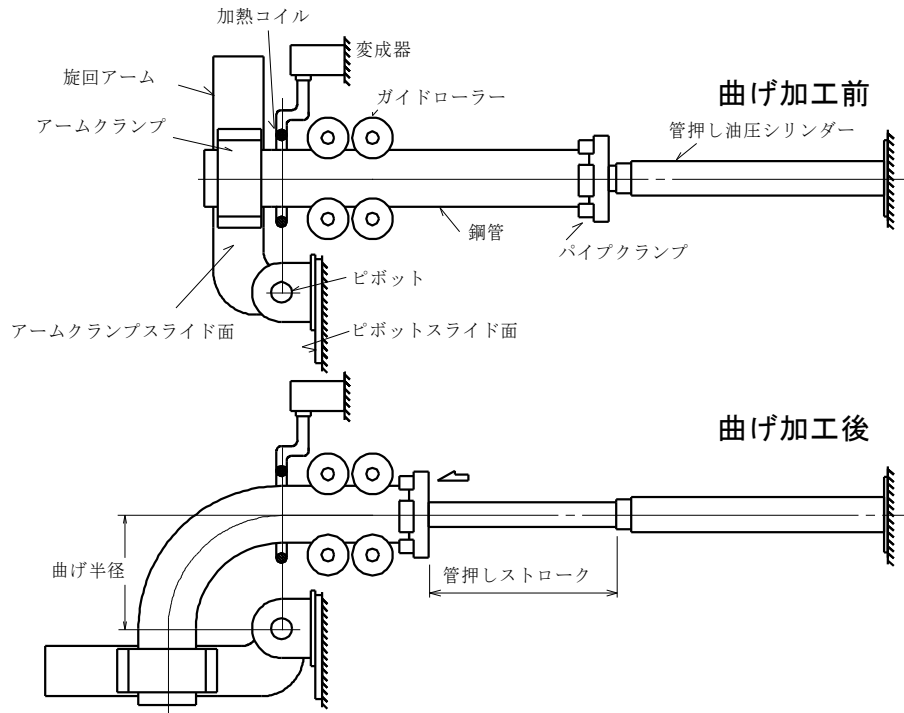


図 2.2.2 高周波曲げ装置の例

高周波曲げの方法は、曲げようとする鋼管をガイドローラーで支え、鋼管の前方を旋回アーム上のクランプでつかみ、後方を管押し装置のパイプクランプでつかむ。鋼管の一部を高周波誘導加熱コイルで狭い幅に環状加熱する。この状態で鋼管を後方から押し出すと加熱部に曲げ塑性変形が集中する。加熱コイルには鋼管の前方を水冷するための冷却水噴出口があり曲げられた部分を冷却するから加熱部は常に狭い幅を維持して座屈変形を防止している。

### 2.2.3) 従来の高周波曲げの課題

#### 1) エルボは JIS 規格品であり一品一様の寸法仕様には対応していない

このことは顧客にとって一見不親切のように見えるが、実際の配管工事現場ではエルボを標準寸法の配管部品として取り扱っているから現場作業者に配管図とエルボとパイプを渡しておけば組み立てることができる。

一方、高周波曲げ管は顧客の一品一様の製作図面に従って製作するので、1.5DR、2DR、3DR、5DR など様々な曲げ半径 (\*1) の製品があり、曲がり部の両側にある直管の長さや曲げ角度そして曲げ箇所の数も曲げ管 1 本ごとに指定した図面がある。曲がり部と直管が一体となった配管ユニットを工場でプレファブリケーションするのであるから配管設計と曲げ管の設計が適切に行われると、施工の難しい配管ルートであってもジャストフィットすることが期待される。その反面、寸法が少し違うだけの目視で見分けにくい一品一様の曲げ管が大量に配管工事現場に納入されると保管管理の難しさが増したり、配管設計に変更があると現場での対応が難しくなることが一品一様の製作物の問題である。

## 2) 曲げ加工による肉厚減少の課題

砂曲げは精密な温度管理が難しかったことと小半径曲げができなかった。エルボは溶接箇所数を削減できなかった。そこで高周波曲げによりこれらの課題への解答がなされたのであるが高周波曲げにも課題がある。それは曲げ加工により外側曲げ半径部の肉厚が素管の肉厚よりも薄くなるということである。

高周波曲げ加工による肉厚減少率は曲げ半径により異なり、1.5DR 曲げでは 25～30%もの肉厚減少を、3DR 曲げでは 13～15%もの肉厚減少を発生している。

一例として、図 2.2.3 に米 Bend Teck 社の公表データを次に示す。

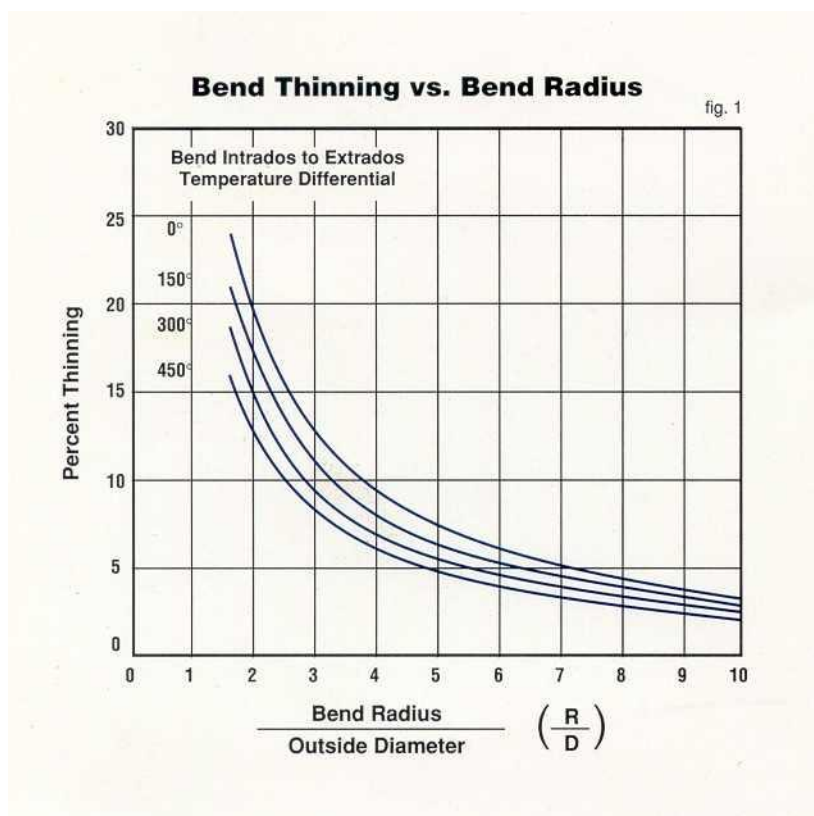


図 2.2.3 Bend Teck 社の曲げデータ

横軸に管外形で正規化した曲げ半径（曲げ半径／管外径= $R/D$ ）をとり、縦軸に曲げ加工による肉厚減少率をとる。ここで肉厚減少率＝（（曲げ前の肉厚－曲げ後の肉厚）／曲げ前の肉厚）×100%グラフには 0° 150° 300° 450° の線が描かれているが、これは外側曲げ半径（背）と内側曲げ半径（腹）との温度差である。

腹側よりも背側の温度を低くすることにより、背の肉厚減少を抑制しようとするものである。背と腹の温度差を大きくすると肉厚減少が抑制される傾向にあるが、その一方では曲がり部の形状が楕円化するという欠点が生ずるほか、金属組織的にも標準組織が得にくくなり機械的性質も低下するという問題が生ずる。従って曲げ加工における温度は背も腹も均等の温度が望ましいのである。

図 2.2.4 は、減肉と軸圧縮応力比の関係を示したものであり、現在もっとも主要な減肉抑制方法として、曲げ加工を行う際に軸方向に圧縮応力を負荷することにより肉厚減少を抑制する方法(\*2)が提案されている。この方法は加熱温度は均等加熱なので金属組織的な問題がないという利点がある。図 2.2.4 は加熱部の熱間変形抵抗  $\sigma_y$  を  $7.5\text{kgf/mm}^2$  とし軸方向の圧縮応力  $\sigma_f$  として、 $(\sigma_f/\sigma_y)$  の値を  $0\sim 0.3$  の範囲で変化させ、曲げ半径を  $1.5DR$ 、 $2.0DR$ 、 $3.0DR$ 、 $4.0DR$  および  $5.0DR$  の 5 種類について曲げ加工時の肉厚減少率を評価したものである。

この結果によると軸方向の圧縮応力  $\sigma_f$  が大きいほど肉厚減少は抑制されることが分かり、推測では  $(\sigma_f/\sigma_y)$  の値を 1 にまで大きくすれば減肉率はゼロになると思われる。しかしながら、あまりに強大な軸圧縮応力を負荷すると旋回アームやパイプクランプが損傷する。

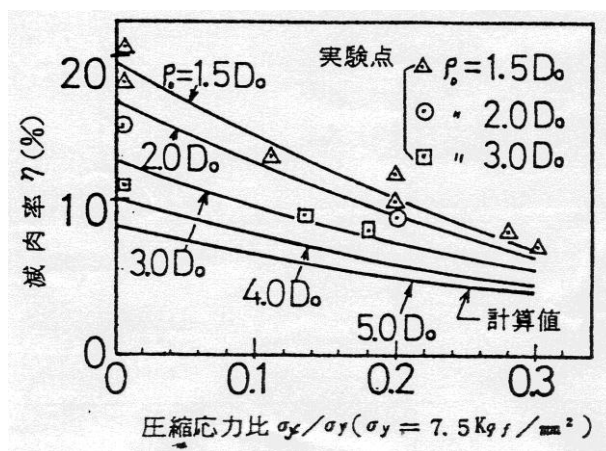


図 2.2.4 減肉率と軸圧縮応力比の関係

### 2.3) 新機構の原理および構造

図 2.3.1 に、外径  $D$ 、長さ  $L$  のパイプが半径  $R$ 、曲げ角度  $\theta$  で曲がったときの一般的な軸方向変形挙動を示す。曲げる前と曲げた後において、軸方向長さ  $L$  が変化しない位置の半径を塑性中立半径  $b$  とする。半径  $b$  より大きい位置においては軸方向に伸びが生じ、半径  $b$  より小さい位置においては軸方向に圧縮されている。

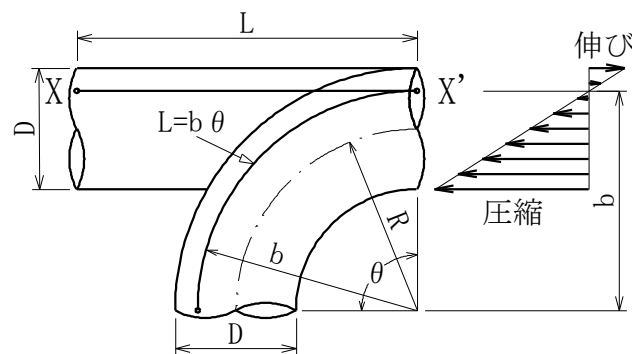


図 2.3.1 バランス曲げの塑性中立半径  $b$

いま、塑性中立半径  $b$  に注目すると、半径  $b$  の仮想円が仮想直線  $X-X'$  に接しながら互いに滑らずに転がることにより、曲げ半径  $R$  曲げ角度  $\theta$  で曲げられていると考えることができる。従ってこの運動は、半径  $b$  の円が直線  $X-X'$  に接しながらサイクロイド運動していると見ることができるのである。

図 2.3.2 に、半径  $b$  の円が直線  $X-X'$  に接しながら滑ることなく  $180^\circ$  転がったときのサイクロイド運動の軌跡を示す。前記図 2.3.1 に示した外径  $D$  で長さ  $L$  のパイプが、半径  $R$  で曲がったときの塑性中立半径  $b$  の運動に注目して示している。

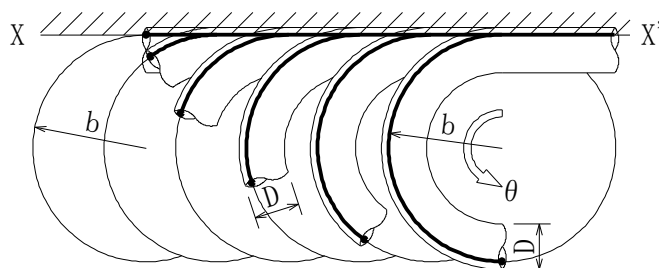


図 2.3.2 曲げの推移

図 2.3.3 は半径  $a$  および半径  $b$  の 2 つの円が一体となって同心円に置かれたモデルを考えたものである。その同心円が前記図 2.3.2 と同様に半径  $b$  の円が直線  $X-X'$  に接しながら互いに滑ることなく  $180^\circ$  転がったときのサイクロイド運動の軌跡を示す。半径  $b$  の円が角度  $\theta$  だけ転がったとき  $X$  方向の円板移動距離  $S$  は、 $S = b \theta$  である。

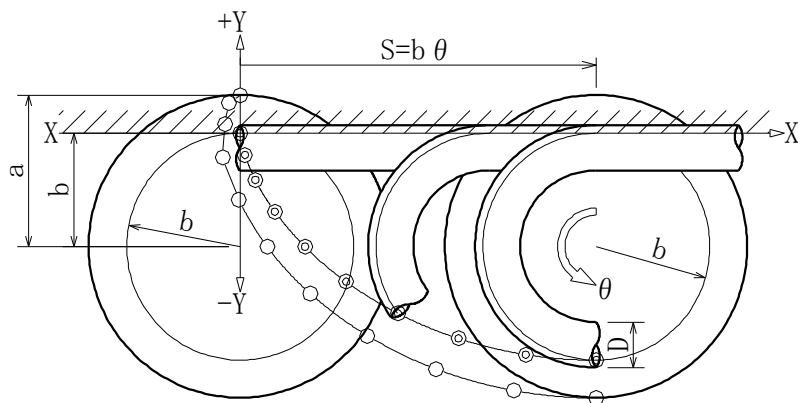


図 2.3.3 曲げの軌道

次に、図 2.3.3 を、 $XY$  座標上のサイクロイド運動として解析する。円板の半径を  $a$  とし曲げ管の塑性中立半径を  $b$  とする。パイプ先端は円板に固定されている。塑性中立半径  $b$  の円が直線  $X-X'$  と互いに滑ることなく右方向にころがるときの半径  $a$  の円板外周の座標  $(X_a, Y_a)$  および塑性中立半径  $b$  の座標  $(X_b, Y_b)$  のサイクロイド運動は次のように表すことができる。表 2.3.1 に、説明に用いた記号とその内容を示す。

表 2.3.1 原理説明に用いた記号と内容

|                             |                                    |
|-----------------------------|------------------------------------|
| a                           | 円板の半径                              |
| b                           | 塑性中立半径                             |
| $\theta$                    | ころがり角度（曲げ角度，ラジアン）                  |
| S                           | ころがり距離                             |
| $\lambda$                   | $\lambda = a / b$ , $\lambda > 1$  |
| D                           | パイプ外径                              |
| 半径 a の円板外周の座標点 (Xa , Ya ) は |                                    |
| Xa =                        | $b (\theta - \lambda \sin \theta)$ |
| Ya =                        | $b (\lambda \cos \theta - 1)$      |
| 半径 b の座標点 (Xb , Yb ) は      |                                    |
| Xb =                        | $b (\cos \theta - 1)$              |
| Yb =                        | $b (\theta - \sin \theta)$         |
| ○                           | 半径 a の円板外周の座標点 (Xa, Ya)            |
| ◎                           | 塑性中立半径 b の座標点 (Xb, Yb)             |

図 2.3.4 には半径 a および半径 b の円板が一体となって同心円に置かれたモデルを考える。このモデルにおいて半径 b の円が直線 X-X' に接しながら互いに滑ることなく角度  $\theta$  だけ転がったときのサイクロイド運動を示す。このとき半径 a の円板の外周にはワイヤロープを案内する溝があり、その溝に沿ってワイヤロープが巻かれている。転がる前のワイヤロープの両端末を F および G とし、円板が角度  $\theta$  だけ転がった後のワイヤロープの両端末を F' および G' とする。端末 F の移動距離は  $(a + b) \theta$  であり、端末 G の移動距離は  $(a - b) \theta$  である。従って逆に言えば、端末 F を  $(a + b) \theta$  だけ引張り、端末 G を  $(a - b) \theta$  だけ繰り出せば、半径 b の円板は直線 X-X' に接しながら滑ることなく角度  $\theta$  だけ転がり、 $S = b \theta$  だけ移動することになる。

従って以上のことから、図 2.3.4 のようにワイヤロープを操作すれば図 2.3.2 の曲げ加工が実行できることがわかる。以下、具体的にその方法について述べる。

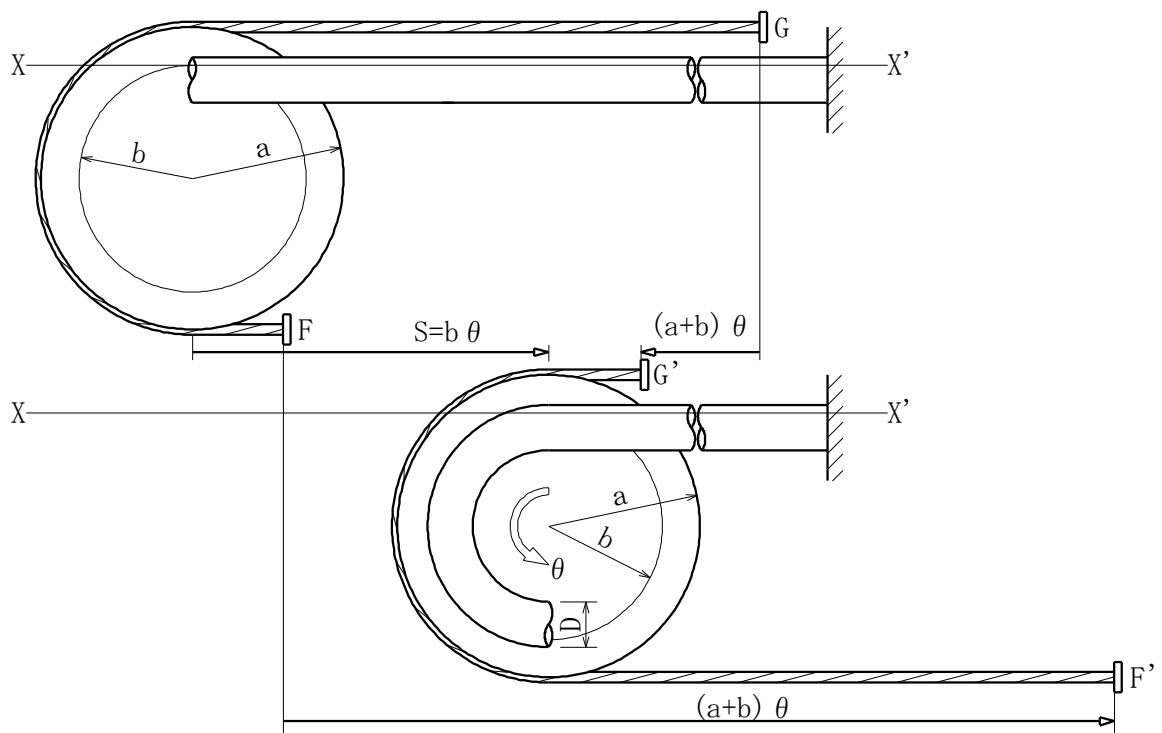


図 2.3.4 プーリ移動時のロープ運動

図 2.3.5 は、本研究開発における曲げ加工の原理を示したものである。パイプの両端に押圧板を置き、パイプを高周波加熱コイルにより円環状に加熱する。次に（パイプ外径／2）の範囲の外側に圧縮荷重 $W_F$ および $W_G$ を負荷する。圧縮荷重 $W_F$ および $W_G$ の総和 $W = W_F + W_G$ は、パイプ加熱部を十分に圧縮できる大きさの荷重である。圧縮荷重 $W_F$ による押圧板の移動量 $\Delta L_F$ および圧縮荷重 $W_G$ による押圧板の移動量 $\Delta L_G$ の関係は、 $\Delta L_F > \Delta L_G$  である。このようにしてパイプを軸方向に圧縮すると、パイプは曲げ角度 $\theta$ に曲げられる。

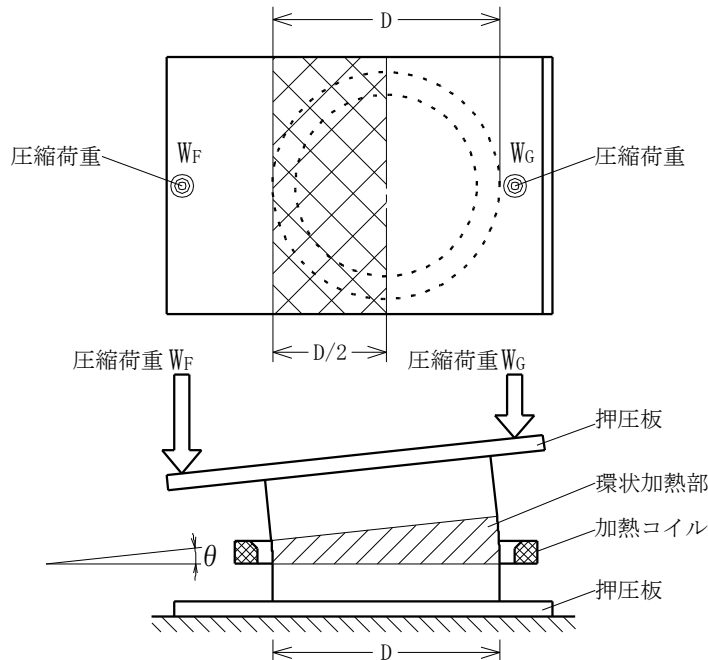


図 2.3.5 パイプ曲げの原理図

次に、図 2.3.6 に示す構造図に従って動作原理を説明する。外径 $D$ のパイプ 1 はクランプ 2 により半径  $a$  の円板 4 に固着されている。高周波加熱コイル 1 1 によりパイプ 1 の外周を円環状に加熱し、同コイルからパイプ 1 の外周を円環状に冷却するための冷却水が噴出している。円板 4 の外周にはワイヤロープ 7 を案内する溝が掘られており、そのワイヤロープ 7 の両端はジャッキ 8 およびジャッキ 9 と結合されている。いま、ジャッキ 8 および 9 に引張り力を発生させて円板 4 を図の右方向に引き寄せるとパイプ 1 には軸方向の圧縮力が発生する。するとパイプ加熱部 1 2 の変形抵抗は隣接している非加熱部のパイプ 1 の変形抵抗よりも小さいので、加熱部 1 2 にのみ塑性変形が集中する。このときジャッキ 8 および 9 の操作は次の様にして行う。

半径  $b$  の仮想円が図の右方向に時計回りで転がるときの直線移動距離を  $S$  とすると、半径  $b$  の仮想円が直線  $X-X'$  に接しながら互いに滑らないで、 $S = b \theta$  の関係をもって時計回りで転がるようにジャッキ 8 および 9 の操作すると同時に、加熱コイル 1 1 を  $S$  だけ右へ移動する。するとパイプ 1 は曲げ半径  $R$ 、曲げ角度  $\theta$  で曲がり、長さ  $b \theta$  だけ加熱コイルを通過して曲げられるのである。尚、曲げが進行するに従って曲がり部の外側半径部に順次に拘束板を装着することにより、曲げ部の変形を防止する。

前記の操作は半径  $b$  の仮想円が、これと接する仮想直線と互いに滑らずに時計回りに転がるようにジャッキ 8 および 9 を操作することであるから、半径  $b$  の仮想円板がサイクロイド運動をしていることになる。従って、半径  $b$  を仮想円板をサイクロイド運動させるためのジャッキ 8 および 9 の操作を

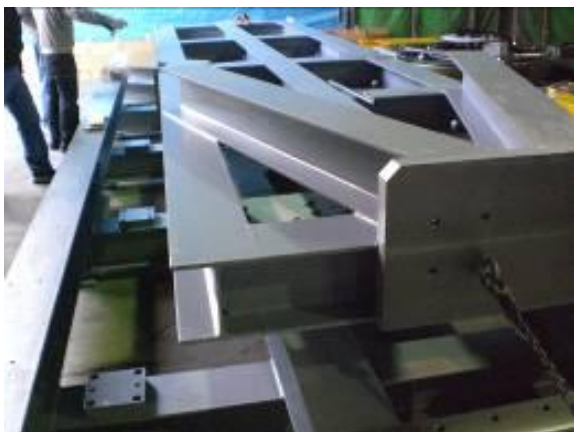
$$\text{ジャッキ 8 の引張り長さ } \Delta L_F = (a + b) \theta$$

$$\text{ジャッキ 9 の繰り出し長さ } \Delta L_G = (a - b) \theta$$

とすることにより実現される。







(3) ベースと台車の据付



(4) プーリの据付

図 2.4.2 組み立て状況



図 2.4.3 完成状態（図 2.4.1 とは逆の視野）

曲げ加工装置の機械本体部は、

(A)マシンベース部

(B) パイプクランプ部

(C) 曲がったパイプ保持用カンザシ部

(D) F, Gシリンダを保持しパイプを圧縮するジャッキ箱部

(E) ワイヤロープでF, Gシリンダと接続されているプーリ円板部

(F) プーリ受け台

(G) 3軸移動機構を有するトランス架台部

から構成され、F,Gジャッキには位置センサが設置されている。

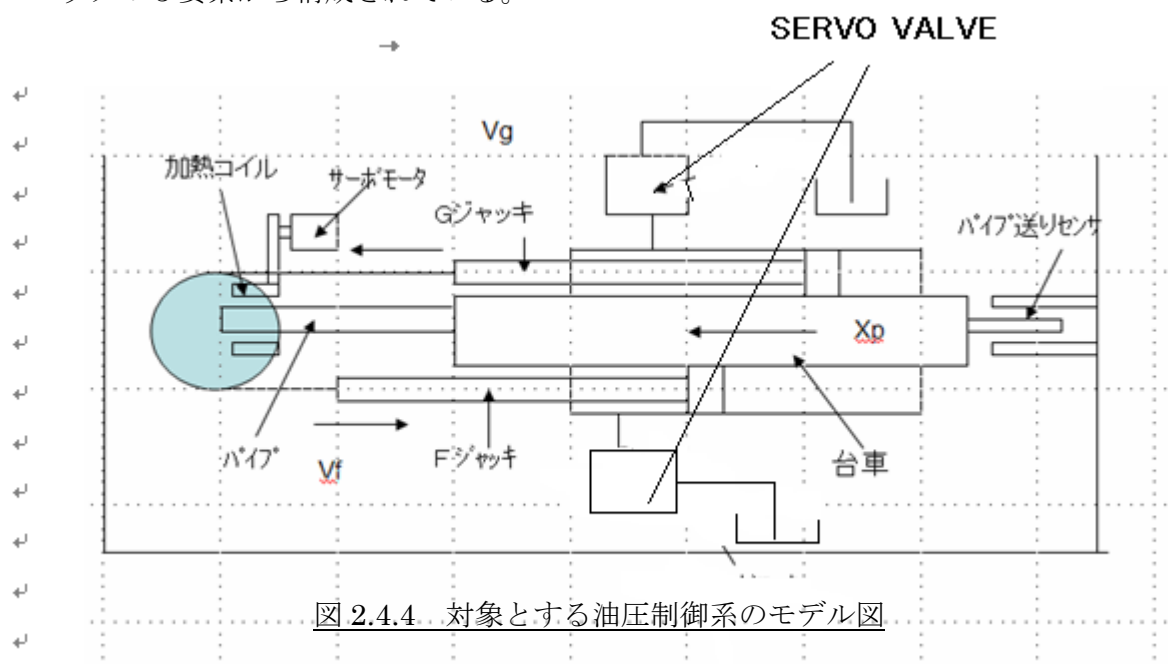
表 2.4.1 に、曲げ機本体部、トランス架台部およびストローク計測部の諸元を示す。

表 2.4.1 各部の諸元

|          |                      | 構造                                                                    |
|----------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 曲げ機本体    | ベース部                 | メインフレームとエンドフレームよりなる<br>L=10350mm W=2760mm、H=430mm                     |
|          | ジャッキ箱                | 2 分割一体ボルト組構造<br>1 個の大きさ(3425×1600mm)<br>側面に F，G シリンダを締結、前面にパイプクランプを締結 |
| トランス架台部  | プーリ円盤                | シーブ径Φ2010<br>F,G ジャッキと連結したワイヤ駆動<br>カンザシ部,シーブ受け台よりなる                   |
|          | 3 軸移動                | X-Y-Z 3 軸移動可能<br>Z=±80mm Y,Z=±10mm                                    |
|          | 3 軸モータ               | Z 軸: AC サーボモータ<br>X,Y: AC モータ<br>駆動電装品                                |
| ストローク計測部 | テープ式パルスセンサ<br>25μピッチ | F,G ジャッキ用<br>ストローク各 3000mm<br>ERGO JAPAN 製                            |

### 2.4.2) 油圧装置の概要

図 2.4.4 は、油圧制御系のモデルを示したもので、油圧シリンダ、油圧ユニット、サーボパックの 3 要素から構成されている。



油圧装置の主たる役割はF ジャッキの速度  $V_f$  と G ジャッキの速度  $V_g$  を正確に制御することである。

図 2.4.5 はサーボユニットの、図 2.4.6 油圧ジャッキストロークセンサの取付状態を示す。



図 2.4.5 サーボユニット



図 2.4.6 油圧シリンダとセンサの取付状態



図 2.4.7 油圧ユニット

F, Gシリンダは $\Phi 200 \times \Phi 110 \times 3000$  ストローク、低摺動パッキング、出力30トン、速度 負荷 max330mm/min 無負荷 max400mm/min の、油圧ユニットは210気圧、20L/minの定格であり、また内部にサーボアンプを内蔵している。

#### 2.4.3) 制御装置の概要

図 2.4.8 に制御装置の概観を示す。FA-PC/Windows にSPXモーションコントローラを付加したものであり、主たる役割は、Fジャッキ速度 $V_f$ 、Gジャッキ速度 $V_g$ に加え、任意の値に制御することである。



図 2.4.8 制御装置

図 2.4.9 は、F ジャッキ速度  $V_f$ 、G ジャッキ速度  $V_g$  に加え、加熱コイルを含む同時 3 軸の速度線図を示したものである。

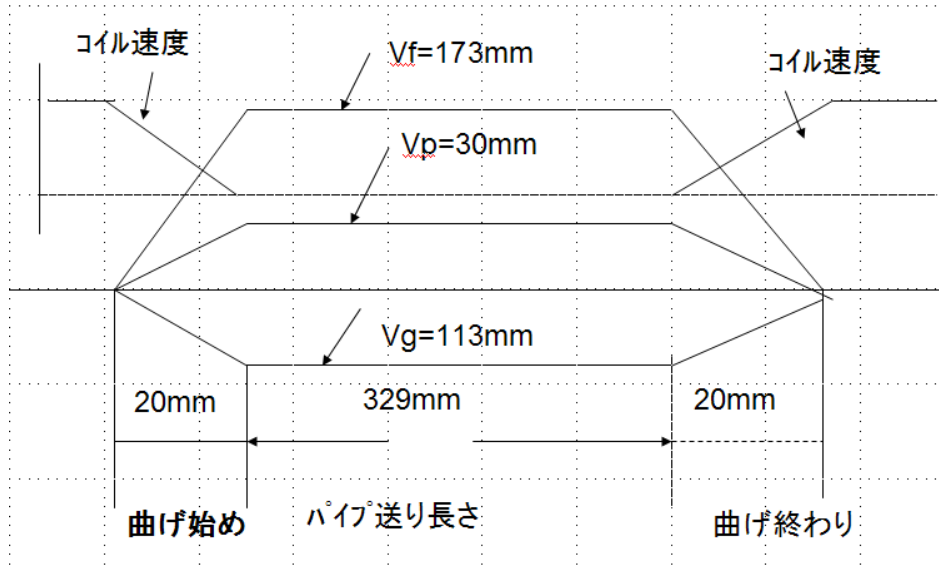


図 2.4.9 3 軸速度線図

制御ブロックは図 2.4.10 に示すごとくであり、F、G ジャッキにパイプ位置およびプーリ回転角を加えた 4 入力の信号により上記 3 出力信号を生成せしめるものである。

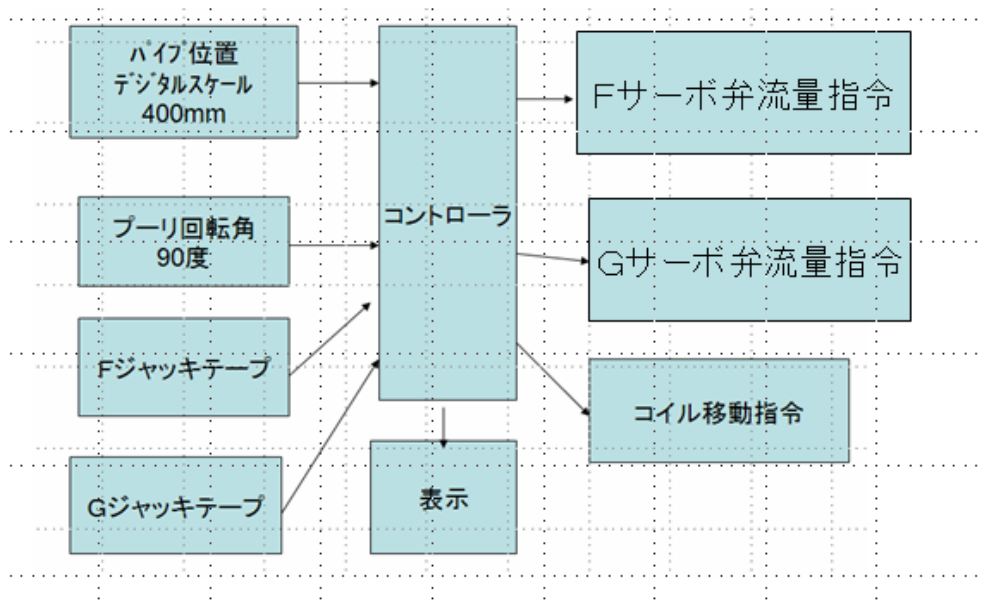


図 2.4.10 制御ブロック

#### 2.4.4) 高周波加熱装置部

高周波加熱装置は、高周波発振機、整合盤、加熱コイル(4 インチ用)から構成される。

図 2.4.11～2.4.12 に各々の構成要素を示す。



図 2.4.11 高周波発振器



図 2.4.12 整合部の移動機構

図 2.4.13～2.4.14 に、加熱コイルの給電部および加熱コイルとパイプとの関係を示す。この部分が高周波曲げのキーコンポーネントで経験を要するところである。



図 2.4.13 加熱コイルの給電部



図 2.4.14 加熱コイルの設置状態

#### 2.4.5) 曲げ加工装置の技術目標値および評価結果

##### 1) 技術目標値

本事業の最終目標である鋼管の「減肉防止曲げ加工」を実現する上で、曲げ加工装置の低速送り時の安定性が重要な要件となる。また、曲げ加工装置の生産性の観点からは、高速送りも必要となる。

そこで、曲げ加工装置の速度制御能力に関し、次の技術目標値を定めた。

- (1) 送り速度制御範囲      :       0～300mm/min
- (2) 送り速度安定度        :       送り速度 10mm/min にて  $\pm 10\%$ 以下

##### 2) 技術目標値に対する評価結果

##### (1) 送り速度制御範囲

最大送り速度を評価するため、300mm/min および 400mm/min 送り速度指令を与え、送り速度を測定した。図 2.4.15 は 300mm/min 時の、図 2.4.16 は 300mm/min 時における送り速度の測定結果を示したものである。

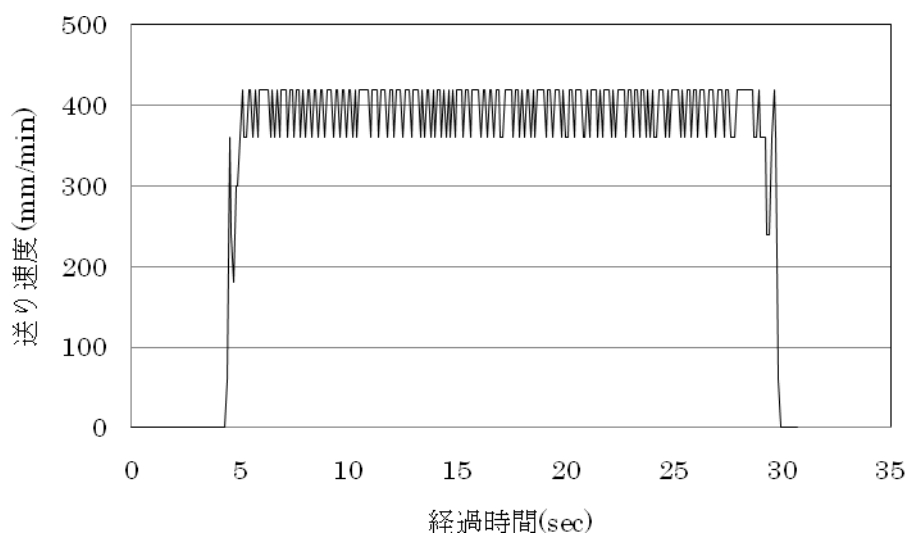


図 2.4.15 送り速度 300mm/min

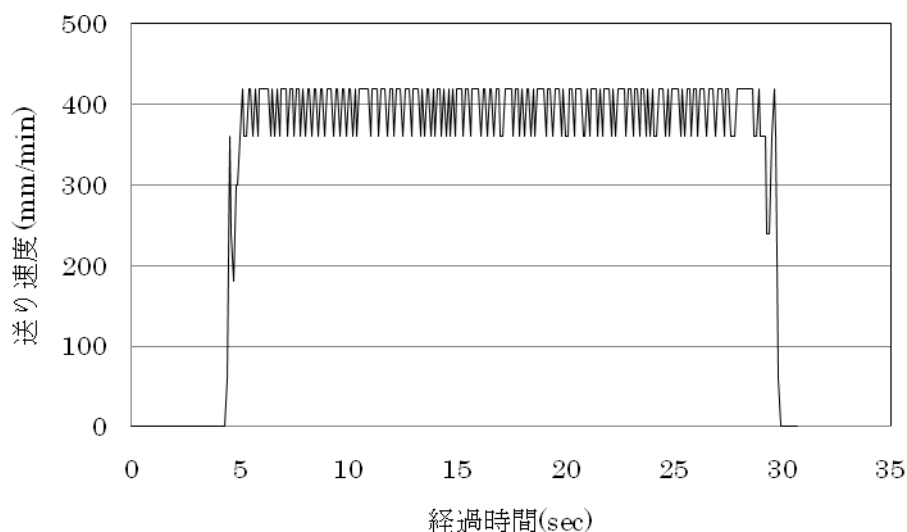


図 2.4.16 送り速度 400mm/min

これより、技術目標として掲げた速度制御範囲のうち、最大送り速度 300mm/min を満足していることが確認できた。

## (2) 送り速度安定度

図 2.4.17 は、10mm/min の送り速度指令に対する実際の速度測定結果を示したものである。

図からもわかるように、実際の速度は 9mm/min に、速度安定度は目標値である $\pm 10\%$ を超える値となり、技術目標値として定めた速度 10mm/min での速度安定度 $\pm 10\%$ は達成できなかった。

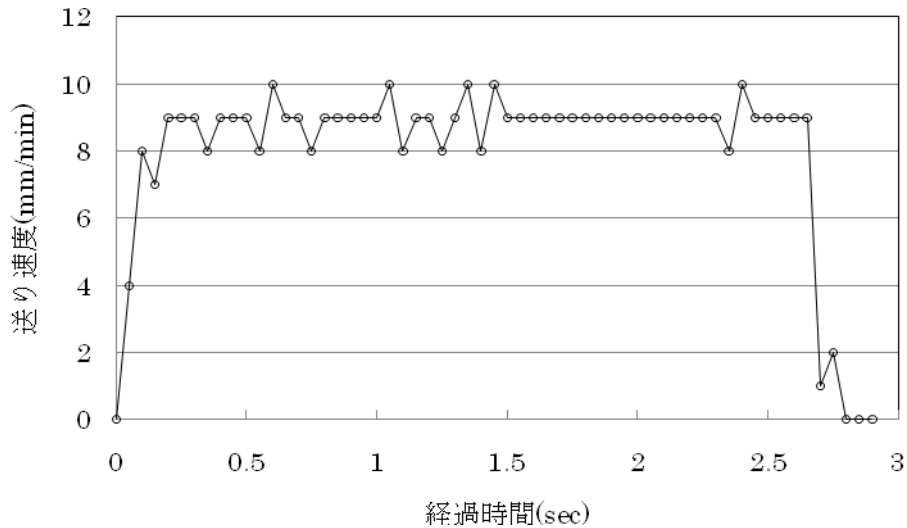


図 2.4.17 10mm/min 時における速度安定度

実際の速度指令と異なった速度となった原因を探るため、12mm/min の速度指令に対しても測定してみた。図 2.4.18 はその結果を示したもので、速度の中心値は指令値どおりになっていること、また、速度安定度も目標値の $\pm 10\%$ を満足していることが確認できた。

速度指令の基準となる位置検出分解能が低かったことが原因と思われる。

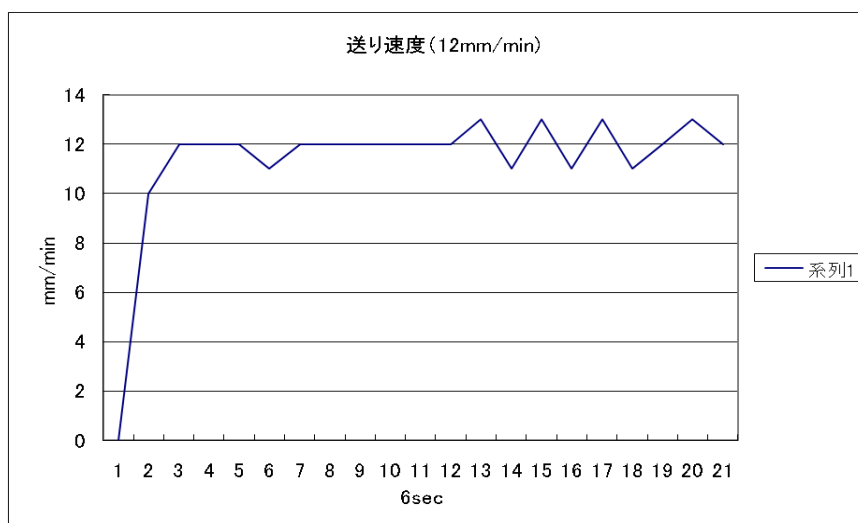


図 2.4.18 12mm/min 時における速度安

## 2.5) まとめ

### 2.5.1) 成果

#### 1) 成果 1

4 インチ鋼管の曲げ加工が可能な曲げ加工装置の設計・製作を完了し、「曲げ加工実験」を実施することができた

#### 2) 成果 2

繰り出しジャッキの送り速度を 400mm/min 迄可変可能であることを確認でき、技術目標値として定めた「最大送り速度：300mm/min」を達成できた。

### 2.5.2) 課題

#### 1) 課題 1

技術目標値として定めた「10mm/min における速度安定度±10%」を達成することができなかった。速度指令の基準となる位置分解能を 0.1mm と設定したためと思われる。リニアセンサ部の設定分解能と制御分解能の最適化が今後の課題となる。

#### 2) 課題 2

今回試作した「曲げ加工装置」は、新しい曲げ理論の実証を目的としたこともあって、パイプの制御、引き出し、加熱コイルの調芯（位置合わせ）等、ほとんどが人力に頼った設計となっている。実験の精度、再現性を高めるためにも、メカ部の手直しや、重要部分の自動化が今後の課題となる。

## 【注】

\*1：曲げの程度を表す DR は、曲げ半径 R(mm)と管の外径 D(mm)との比(R/D)である

\*2：日立製作所 塑性加工学会 第 106 回塑性加工シンポジウムで報告

### 第3章 予備評価およびシミュレーション

#### 3.1) はじめに

実用上最も困難と考えられる曲げ半径  $R/D=1.0$  ( $R$ : 曲げ半径、 $D$ : 素管直径)の曲げ管の製作を目指して、まず、バランス型曲げ管加工理論(第2章2.3で説明済みのため省略)を独自に考案した。

次いで、本理論を具現化した小型実験機を製作する。これを用いてバランス型曲げ加工理論の実証を行い、本加工技術の妥当性を明らかにする。またシミュレーションすることにより本技術を補完する。

#### 3.2) バランス型管曲げ理論の実証実験

実証実験であるため、手持ちの高周波加熱装置の出力 20kw、周波数 20~50kHz を用いて曲げられる小管径の高温配管用炭素鋼鋼管 STPT 370、40A Sch160 (直径: 48.6mm, 厚さ: 7.1mm)を用いた。管曲げ条件は曲げ半径  $R/D=1.0$ 、曲げ角度は 90 度を目標とした。加熱温度 750℃、管送給速度は 6.2~23.4mm/min であった。

##### 3.2.1) 中立軸位置の制御と肉厚変化率

中立軸位置は既に第2章の図2.3.1に見たように曲げ外側肉厚の変化でみることができる。すなわち、図2.3.4に見るように手繰り速度  $V_F$  と繰出し速度  $V_G$  の比により、この比を大きくするにつれて曲げ外側の肉厚変化率はマイナスからプラス側に移っていく。

したがって、手繰り速度  $V_F$  と繰出し速度  $V_G$  の比(以下、単に速度比と表わす。)を制御することにより曲げ中立位置を制御できバランス曲げ理論が実証できた。曲げ管の製作に及ぼす機械の精度は図3.1に示すように、理論値(速度比 2.36)より実際に得られた値(速度比約 2.65)の方が大きい。これは当初計画した管サイズで設計した曲げ機械と実際に曲げた管サイズがやや異なるほか、ロープの伸び、機械の剛性等の影響も考えられる。

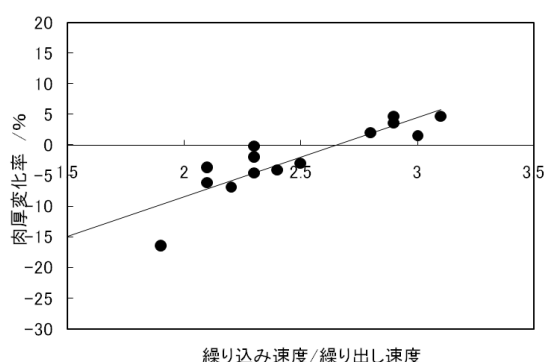


図 3.2.1 肉厚変化率と速度比の関係

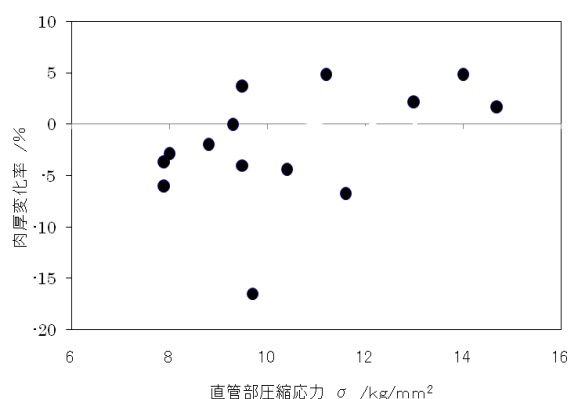


図 3.2.2 肉厚変化率と直管部圧縮応力の関係

バランス型管曲げ機は速度比が管送給速度を支配し、また、軸圧縮力も支配している。図3.2.1および図3.2.2の実験結果に見られるように肉厚変化率に対して軸圧縮応力のばらつきが大きい。この理由は速度を制御するインバータの設定精度がやや低く、速度変化が大きいいため、これが長さ当たりの入熱量に関係してくる。

したがって、図 3.2.3 に見るように軸圧縮応力は管送給速度に依存してくるものと考えられる。また、図 3.2.4 は肉厚測定結果から求めた中立軸位置の結果である。これによれば、理論中立軸 72.9mm より外側にあり、先述した機械の剛性やロープの伸び等の影響で機械の効率が落ちているものと考えられる。図 3.2.4 は欠陥の様子を、図 3.2.5 は、曲げ管の断面写真を示したもので、図中左側の 3 個は減肉、右側の 3 個は増肉したものである。

これに見るように減肉でも曲げ内側にしわ状のものが出たものも見られるが、増肉してもしわ状のものが発生しないものもある。ただし、しわ状のものが出たものでも内面は滑らかである。また曲げ荷重にグラデーションをかけている以外の制御は行っていないが、この条件にしては綺麗に曲がっている。実用化に当たっては、さらに精緻な制御方法を加えればよりよい製品化が可能と考えられるが、しわ状の発生状況を考慮して、とりあえず減肉ゼロ位を狙えばよいと考える。

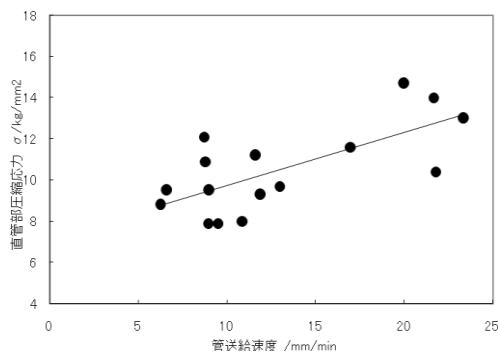


図 3.2.3 直管部圧縮応力と管送給速度の関係

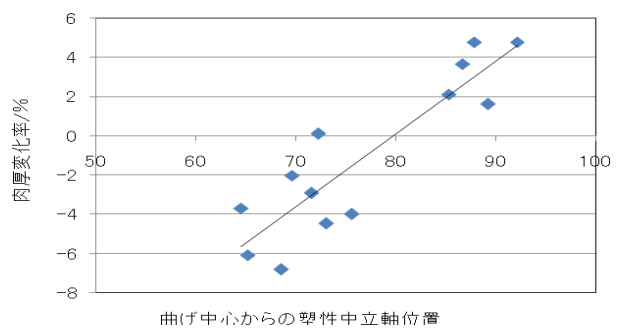


図 3.2.4 肉厚変化率と塑性中立軸の関係

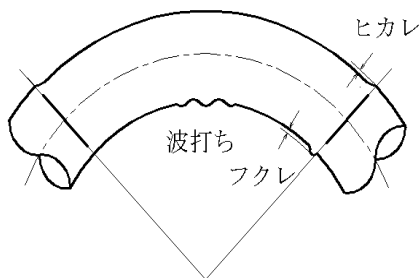


図 3.2.5 曲げ管の外観欠陥



図 3.2.6 曲げ管の断面写真

### 3.2.3) 曲げ管のカタサと金属組織

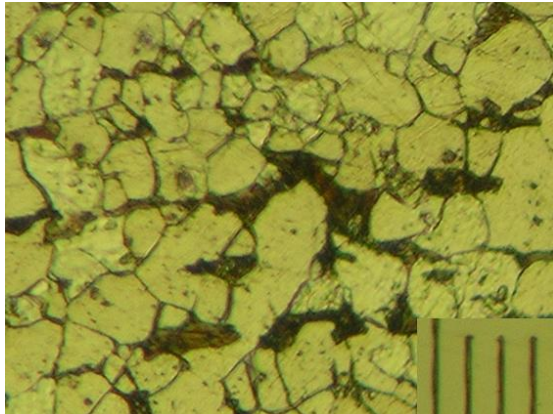
図 3.2.7 に曲げ管の金属組織を示す。素管 (1) は搾出方向に延ばされ黒色に腐食されたパーライト組織と白色のフェライト組織で、特に黒色のパーライト組織は搾出方向への結晶粒の変形が明らかである。

一方、加熱曲げされた (2) 曲げ外側、(3) 管中央、(4) 曲げ内側の組織の組織は、素管

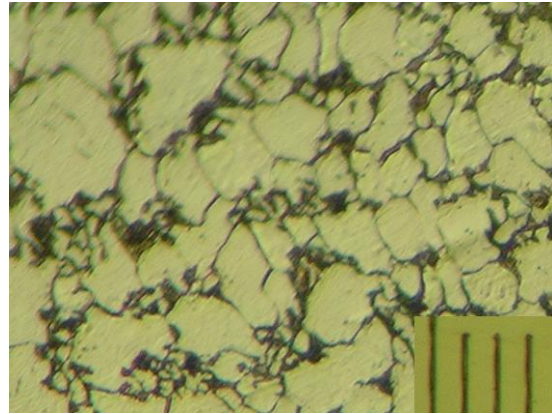
の組織が擡出方向へ結晶粒が変形しているのに対して、加熱帯の軸方向への偏心圧縮により曲げ外側から内側にかけて大きく変形し、内側では非常に大きな圧縮を受けていることがわかる。

また、パーライトの拡散が生じてパーライトが粒状化し、曲げ加工後の硬さが素材よりいずれも硬化しているが ASME 規格の HV207 よりはかなり低い値であり問題はない。

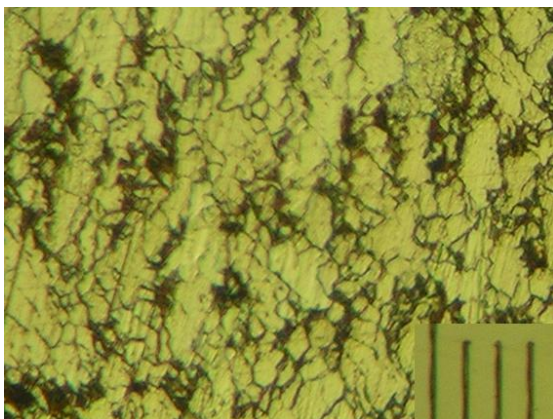
図 3.2.8 は、各部の硬度分布を示したものである。



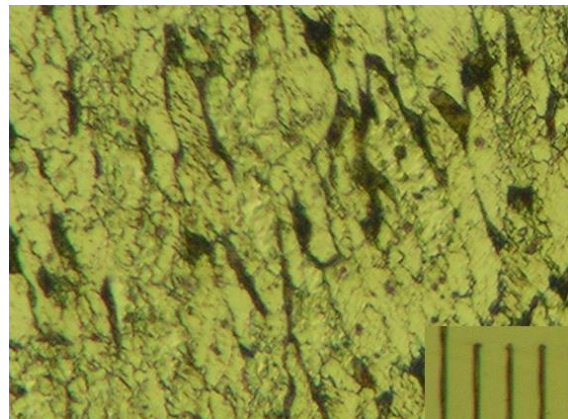
(1) 素管



(2) 曲げ外側



(3) 中間部



(4) 曲げ内側

図 3.2.7 金属組織

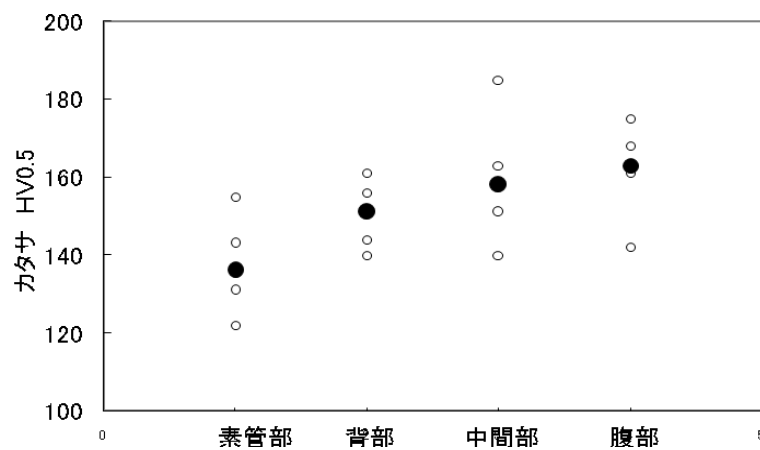


図 3.2.8 曲げ位置と硬さの比較

### 3.3) 曲げシミュレーション

#### 3.3.1) モデル化

高周波管曲げは熱間の大変形解析が必要のため本学の **MARC** を用いたのでは、この解析をするには多くのチューニングが必要になり精度的にも時間的にも対応が難しい。このため、昨今の学会および市場の動向から大変形下の安定性に優れた **Abaqus** を用いるのが適当であると考えて採用した。

シミュレーションするに当たり加熱方法のモデル化に問題がある。それは高周波加熱が内部加熱であり、かつ加熱部が移動することである。内部加熱のモデル化には、(1) 加熱帯に入った要素の接点に次ぎ次ぎに温度を入れる方法、または、(2) 加熱帯に入った要素につきつぎと熱量を与える方法の 2 つの方法が考えられる。

しかしながら、加熱条件は上記方法では経費上、時間の制約上相当無理がある。このため次に示す二つの加工条件を仮定してモデル化を行った。すなわち、① 高周波誘導加熱は内部加熱であるが、簡単のため熱電対で計測した温度分布を外部加熱の形で与え、その熱伝達で行う、② 管の移動条件は速度比  $V_F/V_G$  で与えられるが、今回はロープが柔軟性を持ってプーリーにかかり、かつ剛性を満たさねばならないが、簡単化した類似モデルで考えることとした。すなわち、いずれの計算においても曲げ半径位置 **50.8mm** (本実験でセットする管中心の位置：所定の管が得られず実際は **48.6mm** である) 位置に回転角速度  $\omega = 0.005(\text{rad})$  を与え、このとき素管を取り付ける円板の回転中心は管曲げ半径の中心と一致させたことになる。このとき管送給速度を下記に示す曲げ半径を  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  とし、それぞれ **case-1** ( $=b_1 \cdot \omega$ )、**case-2** ( $=b_2 \cdot \omega$ )、**case-3** ( $=b_3 \cdot \omega$ ) の速度で与えることで行った。計算は  $R/D=1.0$  曲げを対象として塑性加工中心を図 3.3.1 に示すように

**Case-1**：中立軸位置をパイプ外側より内側にした場合  $b_1=58.32\text{mm}$

**Case-2**：中立軸位置をパイプ外側と一致させた場合  $b_2=72.90\text{mm}$

**Case-3**：中立軸位置をパイプ外側より外側にした場合  $b_3=87.48\text{mm}$

の 3 ケースに対してシミュレーションを行った。

#### モデルイメージ

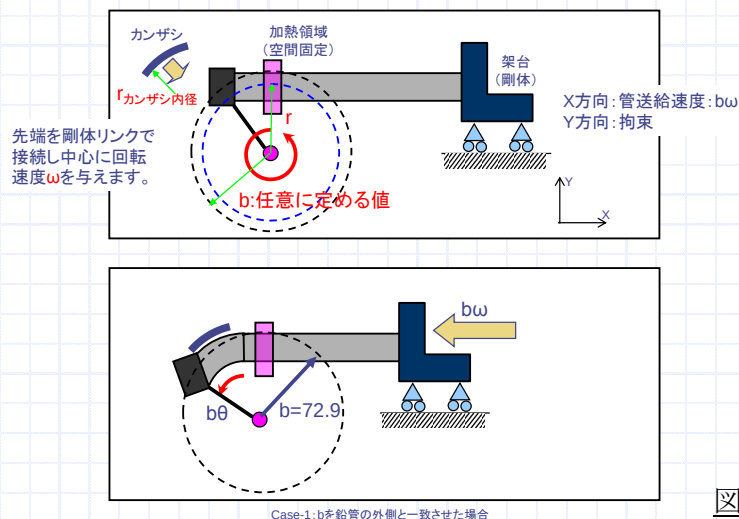


図 3.3.1 シミュレーションモデル

また、計算の元になる降伏応力は、図 3.3.2 に示すように常温と 900℃の降伏応力を線形で近似した。

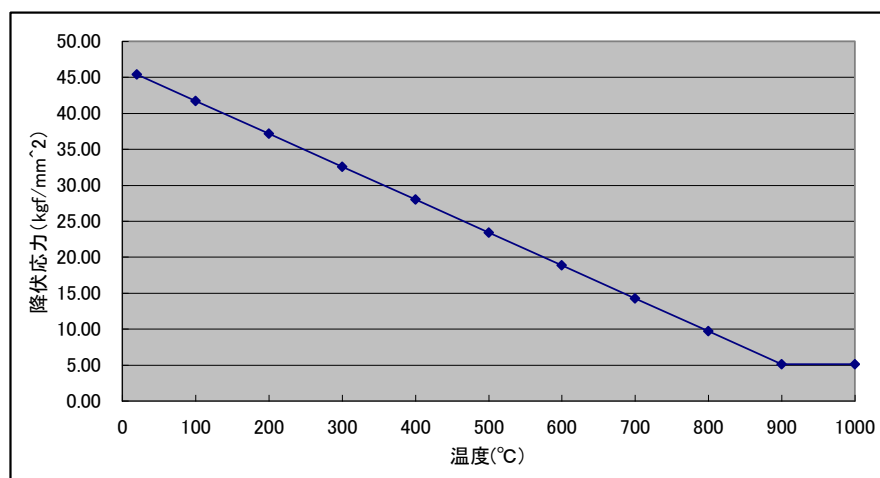


図 3.3.2 降伏応力と温度の関係

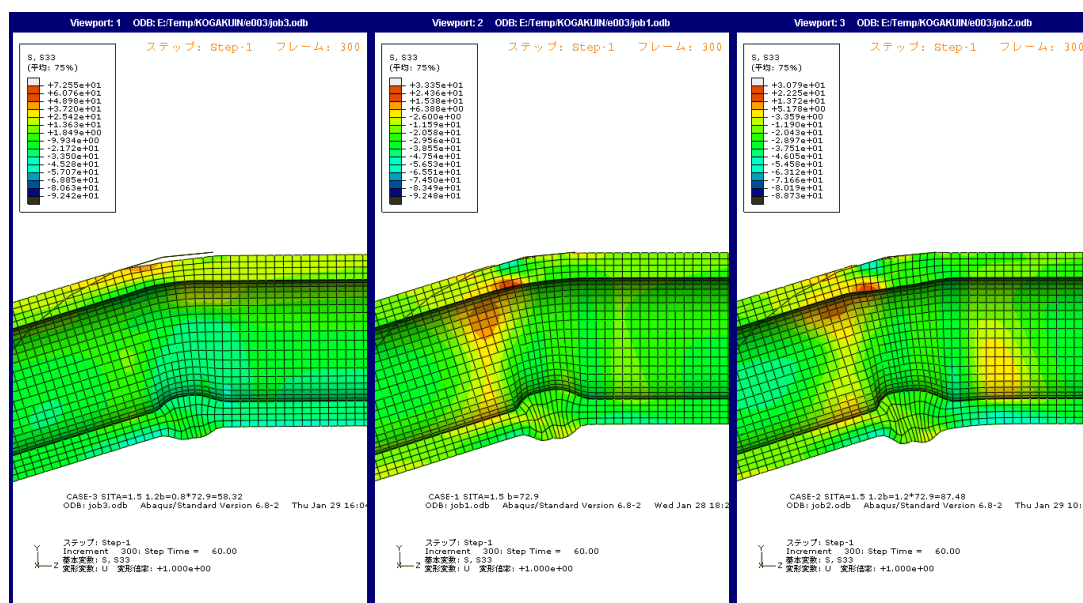
### 3.3.2) シミュレーション結果

圧縮曲げ状態を表す軸応力分布および曲げ状態を図 3.3.2 の (1) 17.2 度、(2) 51.6 度、(3) 85.9 度曲げの場合について、それぞれ case-1～case-3 を比較して示した。

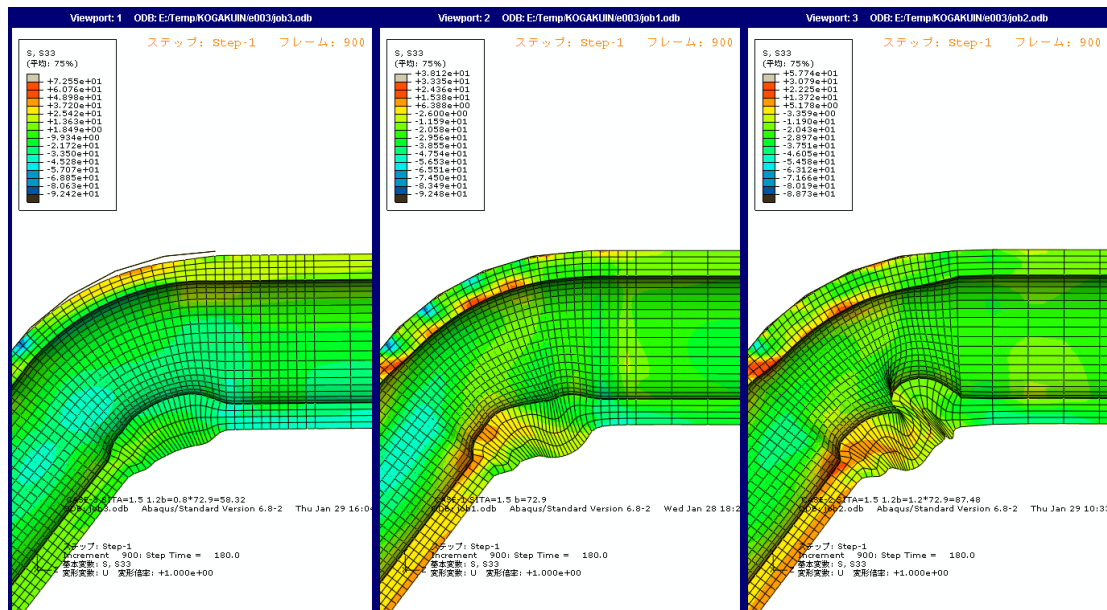
これより明らかに圧縮量の多い case-3 では曲げ角度 34.4 度 (図は省略) あたりから座屈 (しわ) の発生の兆しが表れだしていることが認められる。

圧縮量の比較的少ない case-1 では座屈の兆候がなく滑らかに曲がっており実験結果と対応している。case-2 ではまだ座屈までには至っていないことがわかる。

この傾向はおおむね実験でも同じであり曲げの状態をよく表している。しかしながら、より仔細に検討する、① 温度分布が悪い、② 軸方向応力が大きい、③ しわが発生する という問題が認められる。



(1) 曲げ角度 17.2 度

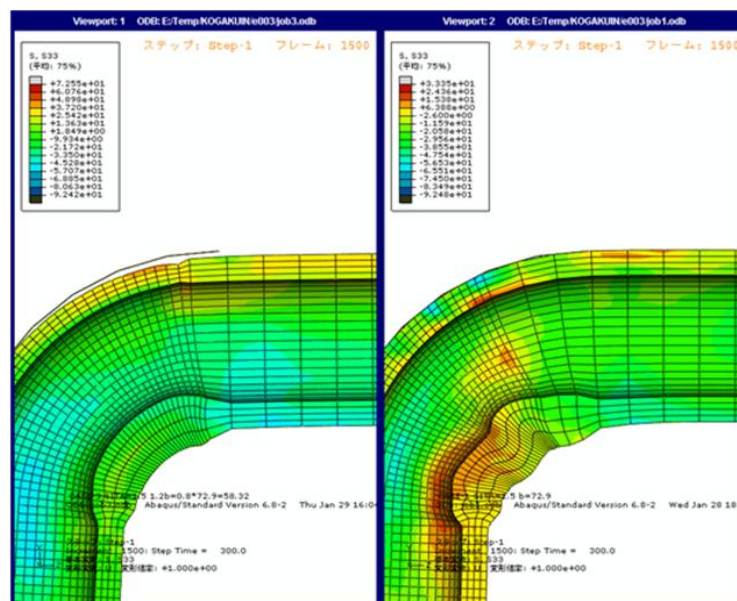


case-1

case-2

case-3

(2) 曲げ角度 51.6 度



case-1

case-2

case-3

(3) 曲げ角度 85.9 度

図 3.3.2 各々の曲げ角度における軸応力分布と変形の様子

以下、このシミュレーション結果について総括すると、

#### 1) 温度分布と軸方向応力

まず、図 3.3.3 に示す (1) 曲げ角度 17.2 度 case-1 の場合についてみる。外部加熱の熱伝達であるから 900℃を超える部分（温度分割の表面温度は 917℃）は表面のごくわずかである。また、板厚の一番内側の温度は 500℃位と読み取れる。したがって、肉厚にわたっての平均温度は 709℃となる。

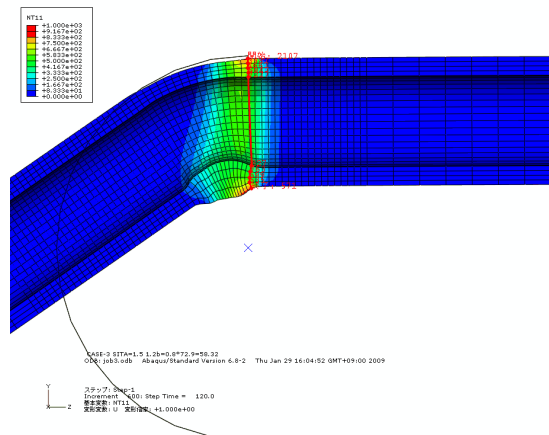


図 3.3.3 曲げ角度 17.2 度の温度分布 (ase-1 の場合)

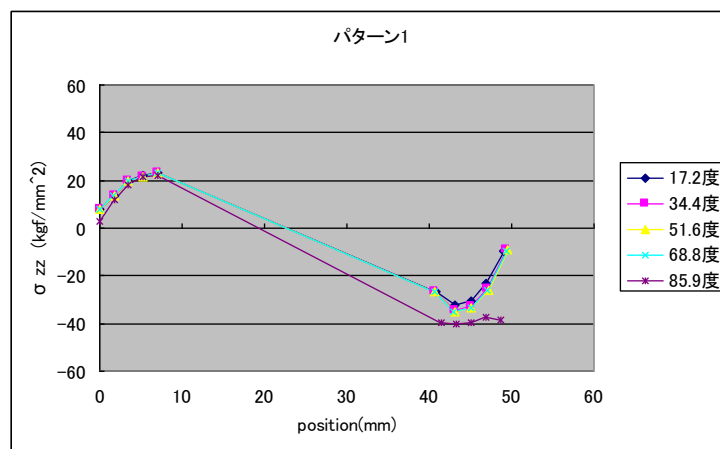


図 3.3.4 軸応力分布 (case-1 の場合)

この温度の降伏応力は約  $13.5 \text{ kg/mm}^2$  となる。ここでは主要な解析点となる曲げ外側について主として考えることにする。一例として、case-1 の場合についての軸圧縮応力のパスプロットを図 3.3.4 に示す。軸圧縮応力のパスプロット図 3.3.4 によれば曲げ角度により応力値は異なるが 17.2 度曲げるとに 5 つの場合を取っている。

表面の平均値は約  $7 \text{ kg/mm}^2$ 、内面の平均値は約  $22 \text{ kg/mm}^2$  肉厚にわたっての平均値は約  $14.5 \text{ kg/mm}^2$  となり、ほぼこの温度の降伏応力に対応する。また、ひかれの状態が見られる。これらより case-1 は曲げ外側が減肉するから軸応力は引張応力約  $14.5 \text{ kg/mm}^2$  である。したがって曲げ外側の肉厚は減肉する。

同様に case-2 の曲げ外側の軸方向応力は  $-22 \sim 20 \text{ kg/mm}^2$  とバラツキは大きいが平均は約  $-7.5 \text{ kg/mm}^2$  と圧縮応力である。これに対して、case-3 は曲げ外側の肉厚が増しており、軸方向応力は圧縮応力約  $25 \text{ kg/mm}^2$  となりおおむね想定したような応力状態である。本来の高周波加熱状態では肉厚全体が  $900^\circ\text{C}$  となりほぼ  $5 \sim 7 \text{ kg/mm}^2$  程度の一様な分布が得られるであろう。

## 2) しわ発生の原因

しわの発生は温度分布に原因する。実際の加熱は高周波誘導加熱であり、浸透深さまではほとんど均等に加熱される。しかし、フェライト部は加熱により  $A_2$  変態点 ( $=770^\circ\text{C}$ ) にな

ると磁気が消失し温度の上昇が減少するが、磁性の残っている次の浸透深さの加熱領域に電流は集中するから内部温度はほとんど表面温度と変わらない。

また、水等の冷却によりかなりはっきりした温度境界が現われるから、本シミュレーションのような熱伝達による広い範囲の加熱帯にはならず、またシミュレーションのような大きな圧縮力も実際には加えることはしないから、軸方向圧縮が加わってもこれほどの座屈（しわ）とはならないであろう。

### 3) 曲げ外側肉厚の変化と曲げ加工荷重

曲げ外側肉厚はバランス型管曲げ理論より中立軸の移動により肉厚が変化する。それを確認したものが図 3.3.5 である。同図の肉厚は曲げ当初位置の、同一断面の曲げ角度の変化に伴う履歴を取ったものである。

図に見るように曲げ外側の減肉条件 case-1 では約 18%の減肉、減肉ゼロ条件の case-2 では曲げ当初は約 2%弱の減肉、55 度曲げ位でゼロとなりそれ以後の曲げでは増肉 3%の増肉となる。増肉条件の case-3 では曲げ当初の約 14%弱の増肉から約 69 度曲げで約 16%の増肉となる。これら肉厚の増減傾向より本曲げ加工理論がシミュレーションからも裏付けられた。

また、本肉厚の曲げ角度による肉厚変化率の傾向を見ると、加熱帯を通過して冷却された後も同一断面の肉厚が変化していることから僅かではあるが曲げ加工荷重を担っていることが予想される。したがって、曲げ加工力は加熱帯のみが曲げ力を担うのではなく、加熱帯を通過後の部分の加工力も計算に入れる必要があろうことが予想される。

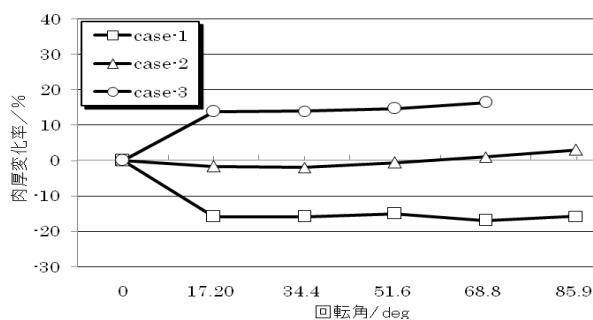


図 3.3.5 同一断面の板厚変化率の履歴

### 3.5) まとめ

バランス型管曲げ理論は小型実験機で実験した結果より、手繰り速度/繰出し速度の比を制御することにより中立軸位置が制御され、中立軸の変化に伴い曲げ外側肉厚も制御できる。したがって、この中立軸の制御により減肉から増肉まで自由に肉厚を制御できることが、実用上最も困難な  $R/D=1.0$  でも実証された。

実用化に向けてはグラデーションを加えて、内側に発生するしわをできるだけなくするようなことが必要である。シミュレーションの結果は、あまり良いモデル化とは言えないが、曲げ加工の特徴をよくとらえており、また曲げ外側における肉厚も仮定したように増減肉の傾向をよく表している。さらに、実験において加工力が加熱帯の降伏応力から計算されたも

のよりやや大きめになるのは曲がった後の部分も曲げ力を受けることが肉厚変化の傾向から読み取れ、これは新しい知見であり実機の設計にもフィードバックできる。

また、シミュレーションは CAE(Computer Aided Engineering)により問題点をあらかじめ検討するのが本来の役割であるが、この程度のモデル化でも相当の新しい知見がみられた。これにより実機での実験期間の短縮化が図れる。

より速い実用化を狙うならば、通常曲げ半径  $R/D=1.5$  で素材肉厚を確保すればよく、増肉は考えなくてもよいからしわの発生も抑制できるであろう。以上のことより、実験的にもシミュレーション結果からも本加工理論は十分実用化できる機能を持っているといえる。

## 第4章 4 インチ鋼管の曲げ実験

### 4.1) はじめに

局部的に加熱することで曲げのパラメータは多くなり最適解に達するまでに多くの実験回数が必要である。さらにトランス台は手動であるので再現性にも問題がでそうであったが曲げの基本パラメータに着目して曲げ実験を試みた。

### 4.2) 曲げ加工実験計画

実験に用いた装置の諸元は第2章で説明済みであるので詳細は省略するが実際の曲げでは高周波加熱装置の操作が重要であるので曲げ条件とともに下記に示した。

#### 4.2.1) 高周波加熱装置

入力電源容量 三相 50/60Hz 200/220V 62kVA

公称出力 50kw

出力周波数 8kHz  $\pm 1.5$  kHz

出力調整範囲 5%~100% (加熱負荷による)

#### 4.2.2) 曲げ条件

供試鋼管 材質 STPG370-E 公称外径 114.3mm 公称肉厚 8.6mm

曲げ半径 152.4mm

曲げ速度 0.75mm/sec

加熱方法 高周波誘導加熱

#### 4.2.3) 実験に適用したパラメータ

今回の実験では、時間的な制約があること、また、曲げ加工装置が手動制御の要素が多いこともあり、パイプ厚の増肉および減肉を制御する引っ張りジャッキと繰り出しジャッキの速度差 ( $V_f/V_g$ ) のみをパラメータとして実験を行った。

### 4.3) 技術目標値および評価方法

#### 4.3.1) 曲げ加工実験における技術目標値

完成した「曲げ加工装置」を用いて、4 インチの鋼管を対象とした曲げ加工実験を行い、ベンド管としての基本性能の評価を進める。

本曲げ加工実験では、現状における「配管用継手を代替しうる性能の「ベンド管」を実現することの目標に、次に掲げる数値目標の実現を目指す。

〈技術目標値〉

- 1) 寸法精度： JIS 規格に定める「配管用継手」の寸法精度の実現

この規格に従い、曲げたパイプはこれを満足する必要がある。

- 2) 曲部増肉； 曲げ部外側の管厚み( $t_1$ ) が、曲げ前の管厚( $t_0$ ) 以上を確保できる

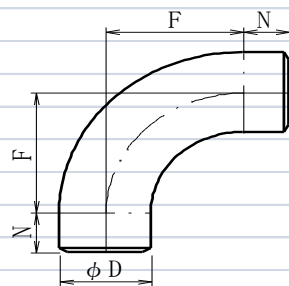
#### 4.3.2) 評価方法

- 1) 寸法精度の評価方法

寸法精度は、曲げ加工後のサンプルと、表 4.3.1 に示す「配管用継ぎ手」の JIS 規格との寸法比較によっておこなった。ただし、今回の寸法精度比較においては、曲げ角度に関する

評価は除外している。

表 4.3.1 JIS 配管用継ぎ手の寸法精度

|                                                                                   |                                  |            |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------|-------------|
|  | JIS B2312 配管用鋼製突合せ溶接式管継手         |            |             |
|                                                                                   | Steel butt-welding pipe fittings |            |             |
|                                                                                   | 管継手の寸法許容差 単位mm                   |            |             |
|                                                                                   | 径の呼び                             |            |             |
|                                                                                   | A                                | 15～65      | 80～100      |
| B                                                                                 | 1/2～2・1/2                        | 3～4        | 5～8         |
| mm                                                                                | 21.7～76.3                        | 89.1～114.3 | 139.8～216.3 |
| 許容差                                                                               |                                  |            |             |
| 端部の外径 (OD)                                                                        | +1.6                             | ± 1.6      | +2.4        |
|                                                                                   | -0.8                             |            | -1.6        |
| 端面の内径 (ID)                                                                        | ±0.8                             | ± 1.6      |             |
| 厚さ                                                                                | + 規定しない                          |            |             |
|                                                                                   | - 12.5%                          |            |             |
| 中心から端面までの距離 (F), (F+N)                                                            | ± 1.6                            |            |             |

## 2) 曲げ部増肉特性の評価

曲げ部の増肉特性は、曲げ加工終了後のサンプルに対し、曲げ開始位置から所定の距離だけ離れた位置の寸法を曲げ加工前の厚み ( $t_0$ ) とし、曲げ加工部の所定の寸法毎の管の厚みを加工後の厚み ( $t_1$ ) とし、次式により管の肉厚変化率 (%) を計算した。

$$\text{肉厚変化率} = (t_1 - t_0)/t_0 \times 100(\%)$$

また、図 4.3.1 は、肉厚変化率の測定における測定位置の決め方を示したものである。

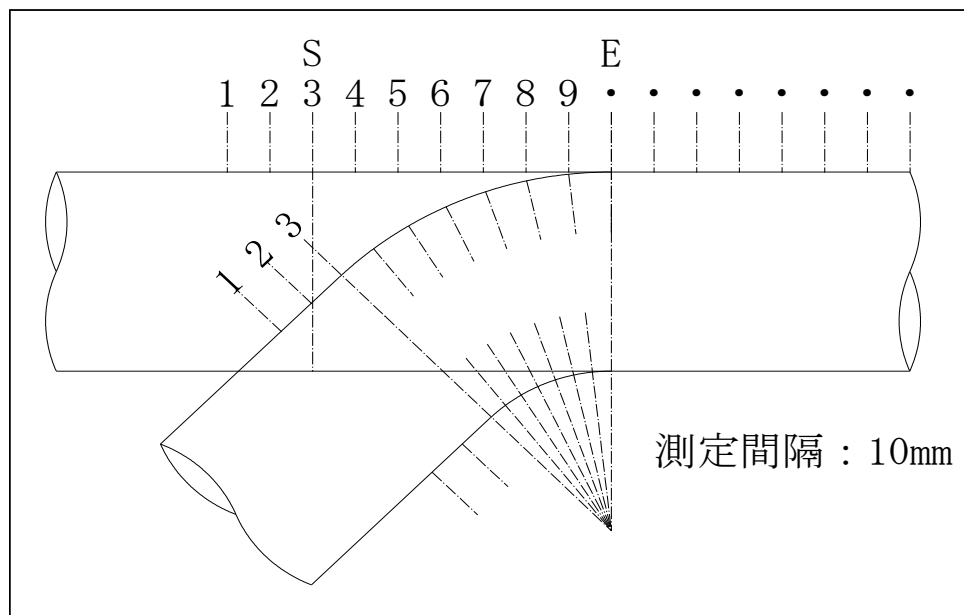


図 4.3.1 肉厚変化率の測定位置

#### 4.4) 評価結果

##### 4.4.1) 寸法精度に対する評価結果

寸法精度測定は、曲げ加工の終了した曲げ番号 3 から曲げ番号 5、曲げ番号 8 から 12 まで、曲げ番号 14 から 16 までの 11 ケースについて寸法精度の測定を行った。

表 4.4.1 に測定結果と JIS 規格に対する判定結果を示したものであり、曲げ番号 14 を除いて後は全部合格していることが確かめられた。曲げ番号 14 は意図的に塑性曲げ中心を内側に設定したので予測される結果と考えている。

表 4.4.1 JIS 配管用継ぎ手の寸法精度

| 100A sch. 80鋼管のJIS規格値 |    |       |       |    |       |      |    |                  |     |
|-----------------------|----|-------|-------|----|-------|------|----|------------------|-----|
| 測定位置                  |    | 端部の外径 |       |    | 端部の内径 |      |    | 厚さ               |     |
|                       |    | OD    |       |    | ID    |      |    |                  |     |
| 許容範囲                  |    | ±1.6  |       |    | ±1.6  |      |    | +規定しない<br>－12.5% |     |
| 最小許容値                 |    | 112.7 |       |    | 95.5  |      |    | 7.525            |     |
| 公称値                   |    | 114.3 |       |    | 97.1  |      |    | 8.6              |     |
| 最大許容値                 |    | 115.9 |       |    | 98.7  |      |    | 規定しない            |     |
|                       |    |       |       |    |       |      |    |                  |     |
| 曲げ管の測定値               |    |       |       |    |       |      |    |                  |     |
| 曲げ番号                  | 位置 | 端部の外径 |       |    | 端部の内径 |      |    | 厚さ               |     |
|                       |    | NN    | CT    | 合否 | NN    | CT   | 合否 | 背部               | 合否  |
| 3                     | S  | 114.7 | 114.2 | 合格 | 98.0  | 98.0 | 合格 | 7.82             | 合格  |
|                       | E  | 114.8 | 114.0 | 合格 | 98.0  | 97.8 | 合格 |                  |     |
| 4                     | S  | 114.4 | 114.3 | 合格 | 97.6  | 97.6 | 合格 | 7.75             | 合格  |
|                       | E  | 114.4 | 114.4 | 合格 | 97.6  | 98.0 | 合格 |                  |     |
| 5                     | S  | 114.6 | 114.5 | 合格 | 97.5  | 97.3 | 合格 | 7.70             | 合格  |
|                       | E  | 114.4 | 114.1 | 合格 | 98.3  | 96.3 | 合格 |                  |     |
| 8                     | S  | 114.2 | 114.0 | 合格 | 96.5  | 96.9 | 合格 | 7.76             | 合格  |
|                       | E  | 114.2 | 114.3 | 合格 | 97.5  | 97.4 | 合格 |                  |     |
| 9                     | S  | 114.5 | 114.4 | 合格 | 97.2  | 97.7 | 合格 | 7.80             | 合格  |
|                       | E  | 114.5 | 114.1 | 合格 | 97.0  | 97.7 | 合格 |                  |     |
| 10                    | S  | 114.4 | 113.8 | 合格 | 97.3  | 97.5 | 合格 | 8.11             | 合格  |
|                       | E  | 114.4 | 114.6 | 合格 | 97.0  | 97.4 | 合格 |                  |     |
| 11                    | S  | 114.5 | 114.5 | 合格 | 96.5  | 97.5 | 合格 | 8.05             | 合格  |
|                       | E  | 114.4 | 114.6 | 合格 | 98.0  | 96.9 | 合格 |                  |     |
| 12                    | S  | 114.6 | 113.8 | 合格 | 97.2  | 97.9 | 合格 | 8.00             | 合格  |
|                       | E  | 114.7 | 114.6 | 合格 | 97.0  | 97.9 | 合格 |                  |     |
| 14                    | S  | 114.2 | 114.5 | 合格 | 97.2  | 97.9 | 合格 | 7.40             | 不合格 |
|                       | E  | 114.2 | 114.6 | 合格 | 98.2  | 97.6 | 合格 |                  |     |
| 15                    | S  | 114.5 | 114.2 | 合格 | 97.5  | 97.7 | 合格 | 7.56             | 合格  |
|                       | E  | 114.5 | 114.5 | 合格 | 97.2  | 97.8 | 合格 |                  |     |
| 16                    | S  | 114.1 | 113.9 | 合格 | 97.3  | 97.6 | 合格 | 7.78             | 合格  |
|                       | E  | 114.3 | 114.2 | 合格 | 97.4  | 97.8 | 合格 |                  |     |
|                       |    |       |       |    |       |      |    |                  |     |

##### 4.4.2) 曲げ部増肉に関する評価結果

###### 1) 曲げ実験サンプルの概要

前述のように、今回の曲げ実験にて評価の対象になった曲げサンプル数は 11 ケであり、このうち 5 ケについては約 90° の、残り 6 については 30° から 50° の曲げ加工に留まった。加熱コイルの稼働範囲が、加工中のパイプの動きに追従できなかったため、コイルの破壊を防ぐため中断したことが原因である。

手動による調芯機構であったことも副次的な原因と考えられる。

## 2) 曲げ部の肉厚変化率

表 4.4.1 は、今回曲げ加工を行ったサンプル 11 について、曲げ加工で設定したジャッキの速度比 ( $V_f/V_g$ ) 条件と、各サンプルの統計データをまとめたものである。

ここで、変化率が“最大”と表されているのは肉厚が最も薄かった測定点におけるデータを、“最小”としているのは肉厚が最も厚かった点のデータを、“平均”は各サンプルの複数のデータの平均値を表しており、これらの数値がプラスの時は加工前に対して増肉が、マイナスの時は減肉が発生したことを示している。

表 4.4.1 肉厚変化率測定結果

|         |    | 03    | 04    | 05    | 08    | 09    | 10    | 11    | 12    | 15    | 16    |
|---------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 変化率 (%) | 最大 | -4.64 | -7.13 | -4.74 | -4.44 | -6.91 | -2.47 | -3.24 | -6.33 | -6.91 | -8.30 |
|         | 最小 | 1.05  | 1.93  | 3.44  | -0.43 | 2.72  | 0.87  | 2.56  | -0.06 | 2.41  | -1.83 |
|         | 平均 | -1.26 | -2.10 | -1.85 | -1.92 | -3.73 | -0.43 | 0.22  | -3.59 | -3.49 | -4.85 |
|         | 偏差 | 2.02  | 1.97  | 2.00  | 1.14  | 2.48  | 0.99  | 2.12  | 1.53  | 3.17  | 1.49  |
| 速度比     |    | 1.53  | 1.53  | 1.53  | 1.53  | 1.53  | 1.56  | 1.59  | 1.56  | 1.50  | 1.52  |

図 4.4.1 は、各サンプルにおいて最も肉厚が薄かった測定点における減肉率を、速度比 ( $V_g/V_f$ ) をパラメータとして表したものである。この表からもわかるように、速度比を大きくすると肉厚変化が小さく、即ち減肉が少なくなっていることがわかる。

しかしながら、最も肉厚が薄かった測定点においては、最良のサンプルにおいても 2.5% 程度の減肉が生じていることがわかる。

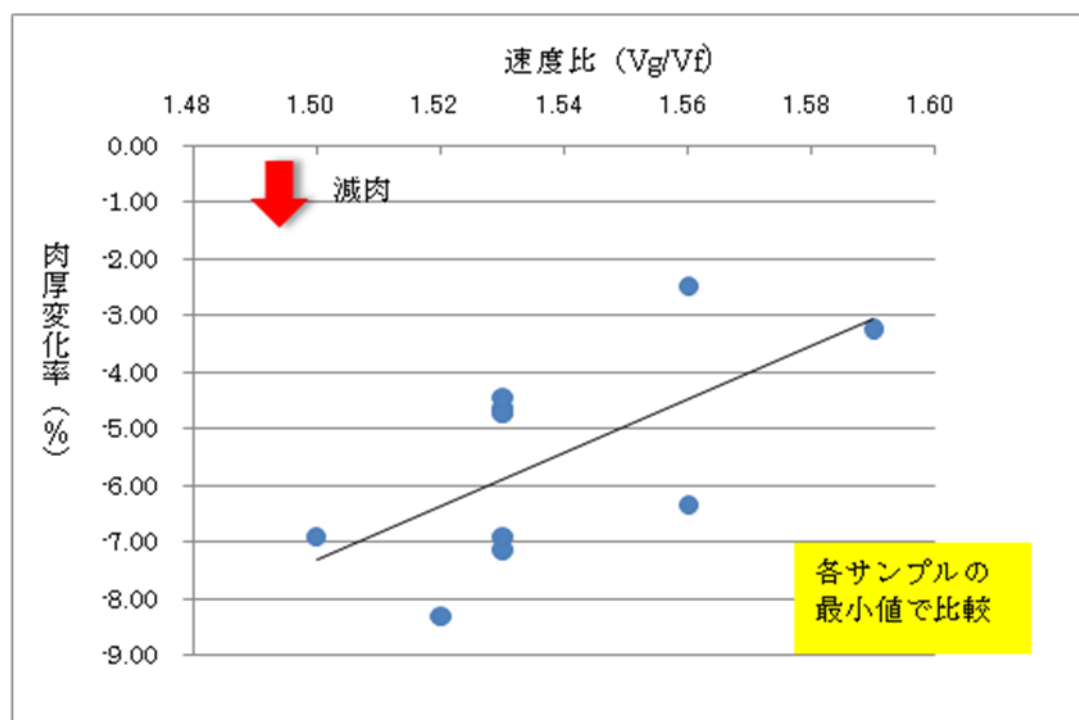


図 4.4.1 速度比( $V_g/V_f$ )と肉厚変化率の関係 (最小値)

次に、図 4.4.2 は、各サンプルにおける肉厚変化率の平均値を、速度比 ( $V_g/V_f$ ) をパラメータとして表したものである。この表からも、速度比を大きくすると肉厚変化率が小さく、即ち減肉が減少する傾向が見られる。また、平均値における評価においては、最良のサンプルにおいては、わずかではあるが増肉 (0.22%) が実現できていることがわかる。

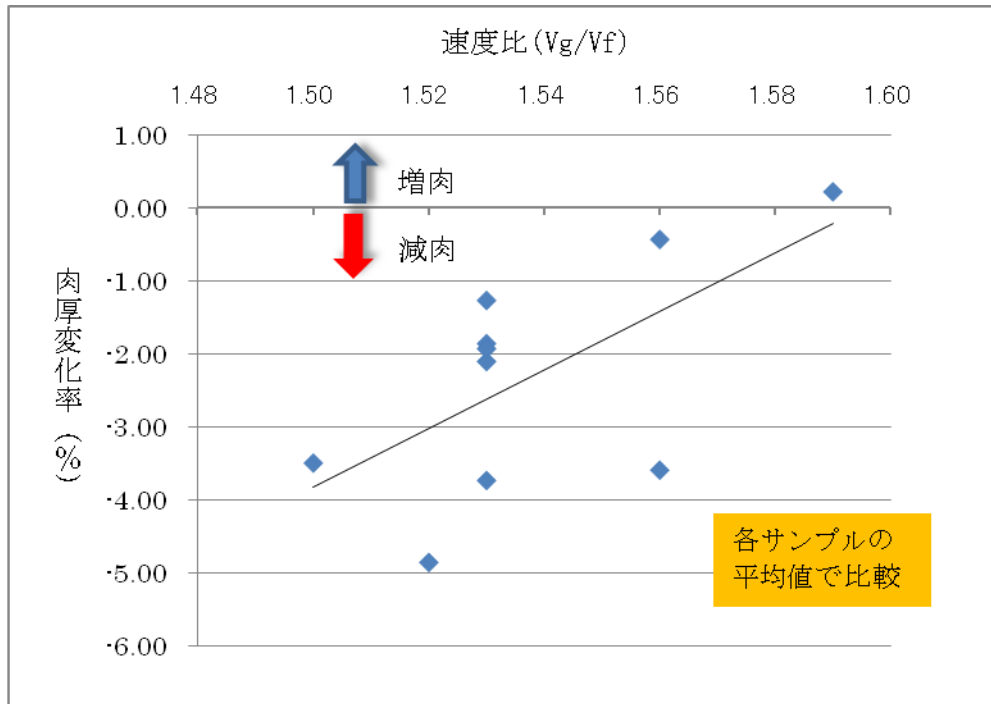


図 4.4.2 速度比と肉厚変化率の関係 (平均)

また、図 4.4.3 は、各サンプルの測定点内のバラツキを示したもので、いずれのサンプルにおいてもバラツキがおおきいことがわかる。

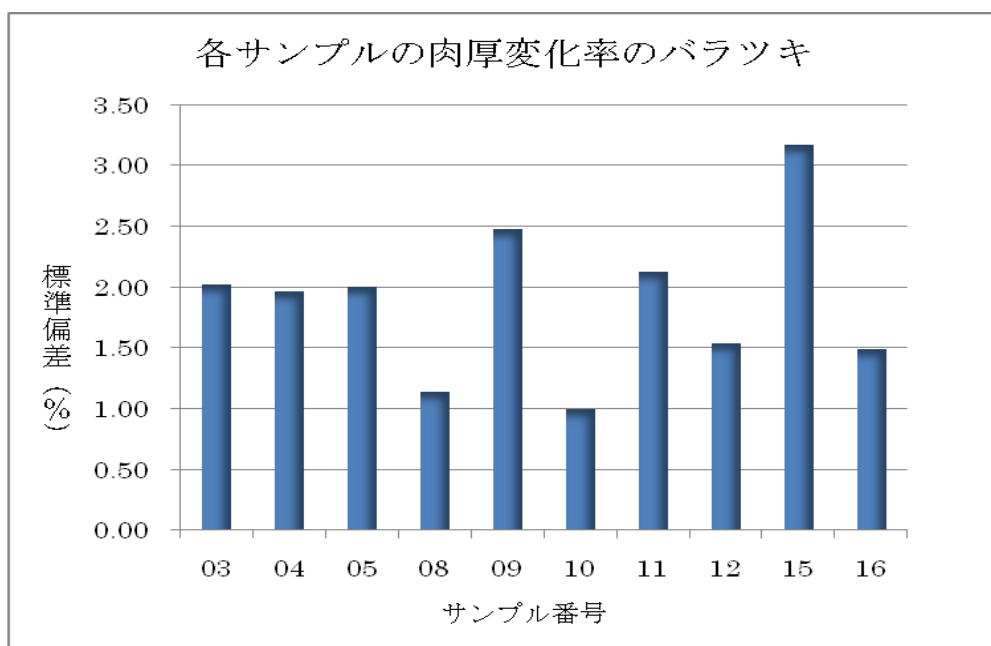


図 4.4.3 各サンプルの肉厚変化率のバラツキ

次に、パイプ軸長にわたる肉厚変化率の分布について述べる。図 4.4.4 はサンプル 10 の図 4.4.5 はサンプル 11 のパイプの軸長にわたる肉厚変化率分布を示したものである。

パイプ曲げ部の約 50%以上の領域においてはいずれのサンプルにおいても肉厚変化率がプラス、即ち増肉が実現できており、軸長にわたる肉厚変化率のバラツキを抑制することにより、パイプ全長にわたって良好な増肉が期待できることを示している。

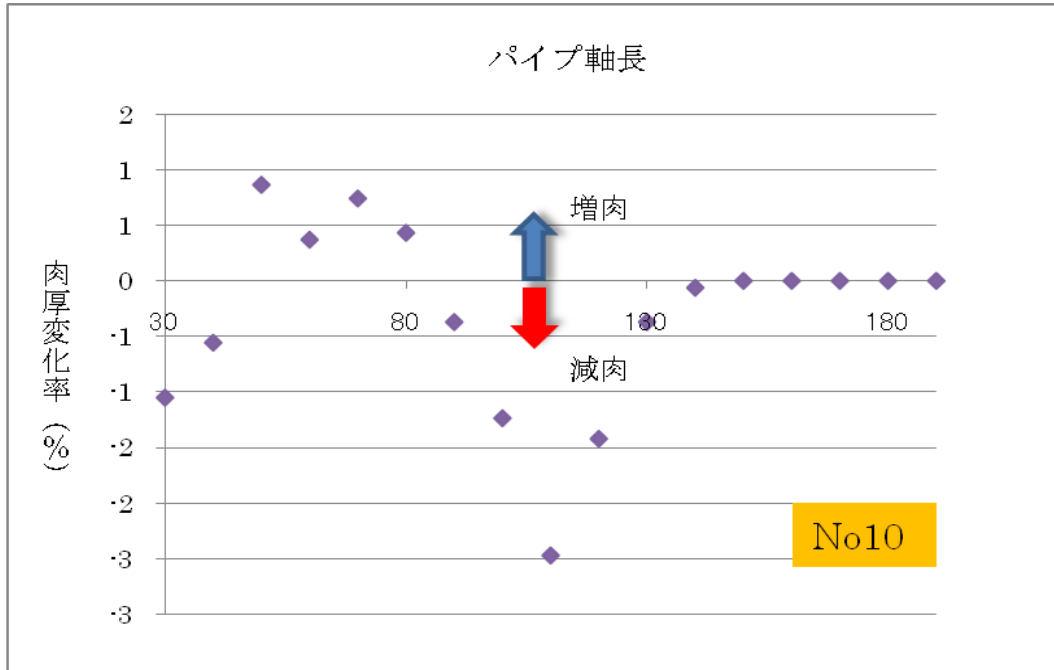


図 4.4.4 パイプ軸長にわたる肉厚変化率の分布 (サンプル : 10)

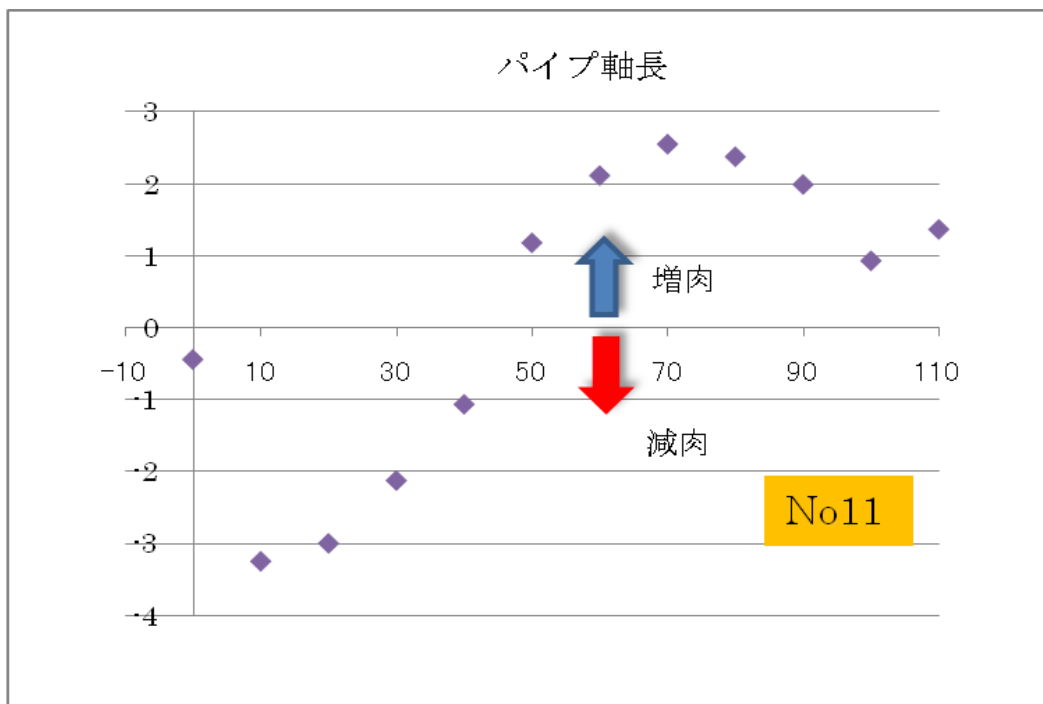


図 4.4.5 パイプ軸長にわたる肉厚変化率の分布 (サンプル 11)

### 3) 曲げの外観

今までは背の肉厚変化を中心としてまとめてきたが、外観についても見てみたい。

図 4.4.6 はサンプル番号 16 の曲げプロファイルで速度比 1.53、肉厚変化率  $-2.75\%$  であり、美しい外観である。

これに対して図 4.4.7 はサンプル番号 8 の曲げプロファイルで速度比 1.53、肉厚変化率  $-3.0\%$  で、曲げ加工の後半にしわ発生が認められる。



図 4.4.6 曲げプロファイルの例 (サンプル 16)



図 4.4.7 曲げプロファイルの例 (サンプル 8)

上記の2ケースにおいて速度比の差は小さいが塑性中立半径に換算すると後者の場合5mm程度外側にあり圧縮領域が広い。これが後者においてしわが出た要因と考えられる。

管の背側における肉厚変化率のバラツキ抑制と併せ、管の腹側におけるしわの発生を抑えるための加工条件の探索が今後の課題となる。

#### 4.5) まとめ

今回の研究開発における基本的な目標は達成できたと考えている。曲げ加工実験を踏まえての成果と今後の課題について述べる。

##### 4.5.1) 成果

###### 1) 曲げ加工実験をととして「曲げ加工機」の肉厚制御理論の正しさが実証された

今回、設計・製作を行った「曲げ加工機」は、引っ張りジャッキと繰り出しジャッキの速度差によって管外側の肉厚を制御可能であるとの理論に基づいている。

今回の曲げ加工実験をととして、理論の正しさが実証された。

###### 2) 技術目標に掲げた「管外側部の増肉」を実証できた

今回の曲げ実験による肉厚変化率の評価において、

(1) パイプ軸長にわたる測定点の平均値として肉厚変化率を評価したとき、曲げ加工サンプルの11番において、0.2%の増肉を実現できた。

(2) 曲げ加工サンプルの10番および11番において、曲げ加工の50%以上の領域で、増肉が実現できた。

##### 4.5.2) 課題

###### 1) 最適加工条件の探索

今回の曲げ実験による肉厚変化率の評価をととし、

(1) パイプ軸長にわたる肉厚変化率のバラツキが大きいこと

(2) 加工条件においては管の内側にしわが発生すること

が判明した。また、

(3) また、研究期間の制約もあり、曲げ加工の品質に大きく影響する他の因子に対する評価ができなかった。

管外側部の曲がり部全域にわたる安定的な増肉と、管内側部のしわのない加工を実現するための最適加工条件の探索が最大の課題である。

###### 2) 市場ニーズと生産性を両立できる品質要件の探索

今回の曲げ加工実験はエルボ管の曲げ規格 1.33DR に準じて曲げ加工実験を行ったが、

(1) 曲げ管における曲げ半径は 1.5DR が一般的である

(2) また、曲げ半径の小径化は、コストアップ要因につながる可能性がある

市場ニーズと生産性の面からも、曲げ半径 1.5DR～2DR での比較評価を行い、市場ニーズにマッチした品質要件を設定する必要がある。

###### 3) 異種材料や大口径管に対する曲げ加工条件の探索

今回の曲げ加工実験には STPG-370E 規格の 4 インチ鋼管を用いた。しかしながら、

(1) 原子力分野では、品質要件の厳しい部分には「ステンレス管」を使用されている

(2) プラント配管にはより大口径の鋼管が使用されている

従って、異種材料やより口径の大きなパイプに対する曲げ加工条件の探索も今後の課題である。

## 第5章. 総合調査結果

### 5.1) 期待される市場動向

原子力プラント、火力発電プラント、化学プラント等のプラント配管は重量や使用する配管の物量（長さ、重量）が膨大であること、また、経済性の面からもコンパクトな配置が要求されるため多数の曲げ配管を用いて建設されるのが特徴である。しかし、現在の曲げ加工技術では配管曲げ部の外管部で肉厚が減少するという問題を抱えている。

また、配管内部を流れる流体による曲げ部の減肉や腐食の問題に対応するため、一ランク上の厚肉鋼管を用いることが通常行われている。そのため配管重量が増加し、プラントコストをより一層増大させるという問題を抱えていた。

一方、最近では省エネや、省コストの観点からも、配管における溶接箇所を極力削減することが求められており、本研究開発の目指す「減肉のない曲げ技術」は、配管曲げ部の減肉、腐食及びコスト低減が課題である原子力プラントの建設に最適な解決策を与える。

そこで、本事業における成果が最も生かされる分野として「原子力プラント」の市場動向を調査した。

#### 5.1.1) 国内における原子力発電の市場動向

原子力産業協会の資料(\*1)によると、日本国内では 55 基の原子力発電所が運転中であり 49,580Mw の電力を生み出している。また、表 5.1.1 は同協会の資料を元に、平成 21 年度の電力各社の供給計画のうち原子力による供給計画分をまとめたものである。

建設中のもの 3 基、計画中のもの 12 基の合計 15 基のうち、2011 年度以降に着工し、2020 年度に完成予定の 10 基が本プロジェクトの成果を適用できる可能性がある。

表 5.1.1 電力各社の電力供給計画（原子力分）

| 電力会社    | 発電所    | 出力(万 kw) | 着工        | 運転開始      | 現状  |
|---------|--------|----------|-----------|-----------|-----|
| 北海道     | 泊-3    | 91.2     | 2003/11   | 2009/12   | 建設中 |
| 東北      | 浪江小高   | 82.5     | 2015 年度   | 2020 年度   |     |
|         | 東通-2   | 138.5    | 2015 年度以降 | 2020 年度以降 |     |
| 東京      | 福島 I-7 | 138.0    | 2011/4    | 2015/10   |     |
|         | 福島 I-8 | 180.0    | 2011/4    | 2016/10   |     |
|         | 東通-1   | 138.5    | 2010/12   | 2017/3    |     |
|         | 東通-2   | 138.5    | 2013 年度以降 | 2019 年度以降 |     |
| 中部      | 浜岡-6   | 140.0    | 2015 年度   | 2019 年度以降 |     |
| 中国      | 島根-3   | 137.3    | 2005/12   | 2011/3    | 建設中 |
|         | 上関-1   | 137.3    | 2010 年度   | 2015 年度   |     |
|         | 上関-2   | 137.3    | 2015 年度   | 2020 年度   |     |
| 九州      | 川内-3   | 159.0    | 2013 年度   | 2019 年度   |     |
| 電源開発    | 大間     | 138.3    | 2008/5    | 2014/11   | 建設中 |
| 日本原子力発電 | 敦賀-3   | 153.8    | 2010/10   | 2016/3    |     |
|         | 敦賀-4   | 153.8    | 2010/10   | 2017/3    |     |

### 5.1.2) 海外原子力発電の市場動向

#### 1) 稼働中の原子力発電所

同じく、原子力産業協会の資料(\*2)によると、現在世界では 31 ヶ国で合計 435 基の原子力発電所が稼働しており、その発電量は 39,224 万 kW に及ぶ。このうち、米国、フランス、日本、ドイツ、ロシアの原子力発電先進国 5 カ国だけで発電所数で 252 基 (58%)、発電量で 26,622 万 kW (68%) のシェアを占めている。

さらに、韓国、ウクライナ、カナダ、英国、スウェーデンを含む上位 10 ヶ国でみると、発電所数で 338 基 (77%) の、発電量では 38,320 万 kW (85%) のシェアを占めている。

#### 2) 建設中の原子力発電所

次に、現在世界では 13 ヶ国で合計 43 基の、発電量で 3,877 万 kW の原子力発電所が建設中であり、原子力先進国 5 ヶ国では、ロシアが 8 基、日本が 3 基、フランスが 1 基の合計 12 基 (28%)、発電量で 1,035 万 kW (27%) の原子力発電所を建設中である。また、上位 10 ヶ国で集計すると韓国の 6 基、ウクライナの 2 基を加えて合計 20 基、発電量で 1,915 万 kW (49%) の原子力発電所を建設中である。さらに、11 位以下 15 位まで含めると、中国の 8 基 790 万 kW、インドの 6 基 316 万 kW、台湾の 2 基 270 万 kW を加えた合計 36 基 (83.7%)、発電量で 3,219 万 kW (84.9%) となる。

これら 3 ヶ国だけでも 16 基 (37.2%)、発電量で 1,316 万 kW (35.5%) の原子力発電所を建設中であり、経済の進展に伴ってエネルギー需要が大幅に増大したいわゆる中進国における原子力発電所の建設を大幅に拡大していることがわかる。

#### 3) 計画中の原子力発電所

次に、現在計画中の原子力発電所は 53 基、発電量は 4,960 万 kW である。このうち、上位 10 ヶ国のシェアは 19 基 (17%)、発電量で 2,440 万 kW (49%) となっている。しかしながら、現在 11 位以下の国で見ると、中国 8 基、インドで 8 基もの計画があり、さらに、現在 30 位以下のインドネシアで 4 基、トルコで 3 基が計画されている等、アジアや中近東領域において原子力発電の計画が多いことがわかる。

### 5.1.3) 最近における原子力発電を巡る動き

また、最近においては、温暖化対策や急増するエネルギー需要に対応するために原子力発電に対する再評価が進んでおり、さらなる計画拡大の動きがある。

#### 1) 日本国内の動き

現在のところ、国内における具体的な動きは見られない。しかしながら、政権の交代を機に、鳩山内閣は 2020 年度までに温暖化ガスを 1990 年比 25% 削減することを発表した。

日本および海外においても、この目標達成のためには原子力が有力な手段であるとの認識が一般的であり、現在野党の自民党は、「鳩山案を実現するためにはあと 9 基の原子力発電所が必要である。」との報道もある。また、日本の原子力発電所は稼働年数が長く、設計寿命の見直しなどによって既存の原子力発電所の延命を図っているのが現実である。拡大するエネルギーと地球温暖化への解決策として原子力発電所の新設計画が議論される可能性がある。

#### 2) 米国の動き

米国においては、スリーマイル島における事故以来 30 年ぶりに新規建設の動きがある。また、最近の新聞記事 (\*3)によると、米国の原子力規制委員会が 13 計画、最大 22 基の原子力開発計画を審査しており、内 2 基に最大 83 億ドル(7,500 億円)の政府保証を供与するとの報道があった。

オバマ政権は、風力発電や太陽光発電などの代替エネルギー開発を積極的に進めているが、国内の膨大なエネルギー需要をまかなうには力不足である。

発注元である電力会社に資金面での後ろ盾ができたことにより、米国という巨大市場の原子力ビジネスが本格的に動き出す可能性がある。

表 5.1.2 は同報道をもとに米国における主な原子力発電新設計画をまとめたものである。

表 5.1.2 米国の主な新規原子力発電プロジェクト

| 電力会社        | 建設予定地      | 炉型     | 開発メーカー  |
|-------------|------------|--------|---------|
| PPL ベルベンド   | ベルベンド      | EPR    | 仏アレバ    |
| テネシー溪谷開発公社  | ベルファルデ     | AP1000 |         |
| アメレン UE     | キャラウエイ     | EPR    |         |
| ユニスター など    | カルバートクリフス  | EPR    |         |
| ルミナント       | コマンチェピーク   | APWR   | 三菱重工    |
| デトロイト・エディソン | エンリコ・フェルミ  | ESBWR  | GE・日立連合 |
| エンタジー       | グランドガルフ    | ESBWR  |         |
| プログレス・エナジー  | レビー        | AP1000 |         |
| ユニスター など    | ナインマイルポイント | EPR    |         |
| ドミニオン       | ノースアナ      | ESBWR  |         |
| エンタジー       | リバーベンド     | ESBWR  |         |
| プログレス・エナジー  | シアロン・ハリス   | AP1000 |         |
| STPNOC      | サウステキサス    | ABWR   |         |
| フロリダ・パワー    | ターキーポイント   | AP1000 |         |
| エクセロン       | ビクトリア      | ESBWR  |         |
| SCE & G     | バージル・C・サマー | AP1000 |         |
| サザン         | ボーグル       | AP1000 |         |
| デューク・エナジー   | ウィリアム・ステーツ | AP1000 |         |

## 2) 欧州各国

欧州各国は「脱原子力」から「原子力回帰」の動きがある。チェルノブイリ事故以降原子力に否定的だった英国、イタリア、スウェーデンなどが新規建設に向け方針を変更している。

### 3) 中国・インド・ロシア

中国やインド、ロシアなどは各国とも 20～40 基の大規模な新設計画を持っている

### 4) 中東・東南アジア

中東や東南アジアにおいては新規導入を計画する国が急増しており、UAE やベトナムが先行している。これらの動きをみると、世界レベルでみると少なくとも 50 基以上、最近の計画急増を考慮にいと、100 基を超える建設計画が見込まれる。

## 5.2) 事業展開に向けた今後の課題

前述のように、本事業の成果を最も活用可能な市場が原子力プラントであり、国内および海外においても十分な市場が期待できることが明らかになった。

現在、プラント配管用の曲げ管の製造には、高周波誘導加熱法を用いた「旋回アーム方曲げ加工装置」が用いられているが、曲げ部内側の減肉が最大の課題であり、その点からも本事業の成果である「減肉のない曲げ加工技術（加工装置）の開発」は、これら原子力プラント事業へ参入する上で大きな武器となる。

ここでは、本事業の成果を活かした「ベンド管ビジネス」に関し、「鋼管曲げ加工装置」に要求される今後の課題についての調査結果を示す。

### 5.2.1) 可搬性の改善

規模にもよるが、原子力発電所は 1 基あたり数千トンにおよぶ鋼管を使用するといわれている。また、多くの原子力プラントメーカーがその傘下に曲げ管を加工する製造子会社を有していることを考えると、輸送コストや製作期間の短縮を図るためには、プラント建設現場で曲げ鋼管を供給できる体制とすることが望ましく、加工装置の可搬性の改善が大きな技術課題となる。

今回開発した曲げ加工装置でも、従来の旋回アーム式曲げ加工装置に比べても十分小型化が実現しているが、例えば、国内ではトレーラ、海外では船等で容易に運搬できる程度に小型化し、「移動工場」として運用できる形態が望まれる。

### 5.2.2) 生産性の改善

今回の研究開発において、4 インチ鋼管に対する減肉のない曲げ加工が実現可能であることが明らかになった。しかしながら、現実の原子力プラントにおいては、多種多様の鋼管と複雑な曲げ加工が必要となる。既存の市場へ参入するという競争環境を考えると、現状の曲げ加工装置を用いた方法に比べて大幅に生産性を改善できる曲げ加工装置とすることが望まれる。

具体的には、加工条件の自動設定やモニタリングなどの段取り作業の短縮、CAD データと組み合わせた連続曲げ技術、自動切断や開先加工などの複合化やロボットの採用などによる省人化が課題となる。

### 5.2.3) 信頼性の改善

従来の曲げ加工装置においては曲げ部の減肉が大きな課題であった。今回開発した曲げ加工方法（曲げ加工装置）は、曲げ部の減肉が発生しないことが最大の強みである一方、世間に認知されていない技術でもある。信頼性の高さを明確に実証するためにも、レーザ

計測装置等を用いた自動寸法計測や曲げ部の厚み自動計測機能と組み合わせたトレーサビリティ保証体制の構築など、ハード面とソフト面を組み合わせた信頼性の向上が課題となる。

また、原子力プラントにおいては施工期間が長期にわたる。曲げ加工装置そのものが長期的に安定して稼働するための信頼性設計も大きな課題となる。

【注】

\*1：原子力産業協会「世界の原子力発電の状況（2009年3月）」

\*2：原子力産業協会「わが国の原子力発電計画（2009年3月）」

\*3：日経新聞（2010.2.17）

以上