# 平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

## 「鋼管製造における回転式連続プレス加工法の開発

## 研究開発成果等報告書

### 平成24年3月

# 委託者 近畿経済産業局 委託先 財団法人大阪科学技術センター

### 一目次一

第1章 研究開発の概要 1
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 1
1.3 成果概要 4
1.3.1 装置具現化の研究
1.3.2 金型の連結 5
1.3.3 成形機能の向上効果
1.4 当該プロジェクトの連絡窓口
第2章 本論 7
2.1 全体概要
2.2 装置の具現化の研究
2.2.1 製作した試作試験機
2.2.2 工具半径の最適値探索
2.2.3 金型の材質
2.2.4 ライン速度
2.3 金型の連結の研究
2.4 成形機能の向上効果
2.4.1 低歪(高延性)鋼管の製造
2.4.2 成形機能向上
2.4.3 薄肉材・難加工材の成形
第3章 全体総括 27

#### 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

自動車産業の更なる軽量化・低コスト化要請に応えるために、高張力鋼板・アルミニウ ム合金等の難加工材を溶接管に成形する製造技術を開発する。金属の溶接管を製造する 方法としては断面内の2次元変形のみを与えるプレス成形が理想的な方法であるが、シ ート材によるバッチ成形であるために生産性が著しく低く、3次元的な変形や工具形状 に起因する成形上のさまざまな問題はあるが、その高い生産性故に広く採用されている ロール成形法に比べて、普及率は低いのが現状である。

本研究では溶接鋼管の製造方法に関して、付加的歪が生じにくいために高品質化 が容易で且つ工具の長寿命化が可能であるプレス成形の特長と、ロール成形のよう な高生産性とを併せ持つ新成形法として、巨大な成形ロールと同等の作用を有する 孔型を持つ金型列を旋回移動させて連続的に鋼管を成形する回転式連続プレス加 工法を開発する。これによって溶接管の性能向上により自動車部品への適用範囲が 拡大し、自動車産業の求める軽量化・低コスト化の要請にも応えることができる。開 発の目標を表 1.1 に示す。

項目		目標	
鋼管の 高機能化		プレス成形と同等の低歪(高延性)鋼管の製造 → 成形歪をt/Dの1.5倍以下にする 薄肉管の製造 → t/D=1%鋼管を安定生産する 難加工材の製造 → 高張力鋼板、アルミ合金等を素材とする鋼管 を製造する	
装置の 高性能 化	高生産 性	ロール成形と同等の高生産性 → ライン速度 100m/min での造管	
	低コスト	金型の長寿命化 → SKD 11材を SCM 材に置き換えて従来と同等の 寿命	

表 1.1 開発の目標

- 1.2 研究体制
- 1.2.1 研究組織



#### 1.2.2 管理体制

1.2.2.1 事業管理者

[財団法人大阪科学技術センター]



1.2.2.2 再委託先

株式会社中田製作所



国立大学法人京都工芸繊維大学



1.2.3 管理員及び研究員

1.2.3.1 【事業管理者】 財団法人大阪科学技術センター

管理員

氏 名	所属・役職
金子輝雄	付属ニューマテリアルセンター総括マネーシャー
井出正裕	付属 ニューマテリアルセンター調査役

研究員 (なし)

1.2.3.2 【再委託先】※研究員のみ

株式会社中田製作所

氏 名	所属・役職		
王 飛舟	取締役		
冨野 孝	技術部 部長		
閼伽井 光朋	技術部 T&Dセンター 課長		
中野 智康	技術部 T&Dセンター 係長		
尹 紀龍	技術部 T&Dセンター		

国立大学法人京都工芸繊維大学

氏 名	所属・役職
秋山 雅義	大学院工芸科学研究科機械システム工学部門 教授
高木 知弘	大学院工芸科学研究科機械システム工学部門准教授

1.2.3.3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人大阪科学技術センター

- (経理担当者) 総務部 参事 木村 和代
- (業務管理者) 付属ニューマテリアルセンター総括マネージャー 金子 輝雄

(再委託先)

株式会社中田製作所

- (経理担当者) 総務部 次長 石崎 幸博
- (業務管理者) 技術部 部長 富野 孝

国立大学法人京都工芸繊維大学

(経理担当者)	財務課 調達検収室 調達第一份	系 係長	岩田容子
(業務管理者)	大学院工芸科学研究科 教授		秋山 雅義

#### 1.2.4 研究開発推進委員会 委員・オブザーバー

	氏名	所属および役職
委員長	木内 学	東京大学名誉教授、木内研究室代表
委員(副委員長)	王 飛舟	㈱中田製作所 取締役
委員(副委員長)	秋山 雅義	京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科 教授
委員	高木 知弘	京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科 准教授
委員	冨野 孝	㈱中田製作所 技術部 部長
委員	閼伽井 光朋	㈱中田製作所 技術部 T&Dセンター 課長
委員	中野 智康	㈱中田製作所 技術部 T&Dセンター 係長
委員	尹 紀龍	㈱中田製作所 技術部 T&Dセンター
オブザーバー	桐本 武志	㈱中田製作所 成形機事業部 主席技師
オブザーバー	大石 智恵	㈱中田製作所 技術部
事務局	金子 輝雄	大阪科学技術センター付属ニューマテリアルセンター 総括マネーシ・ャー
事務局	井出 正裕	大阪科学技術センター付属ニューマテリアルセンター 調査役

1.3 成果概要

1.3.1 装置具現化の研究

(1) 工具半径の最適値探索

工具(成形ロール)の半径を大きくすることにより被成形材との接触応力のピーク値が 減少するが、その一方で装置が受けるトータル荷重が増加する。そこで、溶接工程の試作 試験機を対象に、ピーク線圧とトータル荷重が良好にバランスする工具の半径について検 討した。FEM 解析を行いつつ検討を進め、ロール半径を大きくしていくことにより、ピ ーク線圧が減少する。製品外径の約50 倍(R5000)を超えたところでピーク線圧はほぼ一定 となり、それ以上の大径化はピーク線圧に影響を与えないことがわかった。この結果より 試作試験機で採用する工具半径はR2000 とすることが最適であると判断した。

(2) 金型の材質

本加工法は金型の被成形材との接触応力が低く、相対すべりも少ない。溶接工程の工具 半径はR2000mm を最適値として採用するが、最大負荷製品(φ114.3×6t)の線荷重のピーク 値は約800kgf/mm であり、接触応力は4.5kgf/mm2 と非常に低い。そこで金型の材質には ダイス鋼(SKD11)より安価なクロムモリブデン鋼を採用した。 (3) ライン速度

溶接方法としてTIG 溶接を採用する場合は0.5~3 m/min の低速なライン速度で造管す るが、高周波溶接を採用する場合は20~100 m/min の高速なライン速度が必要となる。製 作したクラスタ成形工程の試作試験機は、この広い速度域でも安定したライン速度と駆動 トルクを得るため、駆動モータにはAC サーボモータを採用した。なお、主にTIG 溶接で 試成形を実施予定であったため低速側に最適化し、設計上のライン速度範囲を0.5~60 m/minとした。

#### 1.3.2 金型の連結

本成形の特徴は、超大径の成形用孔型ロールを分割した形の金型を、成形時だけ連結さ せることで設備の巨大化を抑えて、最小限の空間を占有する形の設備を設計することが可 能である点にある。金型の連結部に存在する間隙と段差が、製品表面上の凹凸にどのよう に影響を及ぼすかを弾塑性有限要素法による解析で明らかにし、その結果の妥当性をプレ ス成形による実験で検証した。また実証機において、隣接金型間の間隙と段差を変化させ た金型を装着することで、上記の結論の妥当性の最終確認を行い、金型形状の仕上げ精度 と剛性管理を行うことで良好な管外面品質を確保できることを確かめた。

測定された管外面形状は、段差に応じて漸増することがわかった。従って隣接金型間の 段差の値を適正に管理することが重要であることが判明した。

実験機において、加工中の金型が相対的にどのように働くかを実測し、それが管外面寸 法に及ぼす影響を精査し、圧延後の管外面形状に及ぼすその効課を評価した。圧延後は、 管外面性状に対する官能検査を行い、あわせて延材の管外径を測定した結果、なだらかな 管径変動が観測され、官能検査も良好であった。管外径の寸法仕様に応じて隣接金型間の 相対的な凹凸を適正すれば、美麗な外表面の管を得ることができることが判明した。

1.3.3 成形機能の向上効果

(1) 低歪(高延性) 鋼管の製造

外径(D)、肉厚(t)の鋼管を製造する場合、平板から管形状へ成形する為に必要な理論上の 最小成形歪み量はt/D となる。ところが、従来のロール成形法では成形ロールへの巻き付 き等により、一般的にt/D の3 倍以上の歪が発生する。製作した試作試験機を対象とした FEM 解析を行い、高延性のステンレス鋼管(成形歪がt/D の1.5 倍以下の鋼管)が製造可 能であることを確認した。成形過程で生じる相当塑性歪をFEM 解析により評価したとこ ろ、薄肉材、厚肉材共に目標値であるt/D の1.5 倍以下を達成していることを確認した。 (2) 成形機能向上

溶接工程を対象に、巨大工具径による成形の改善効果を確認するため、同一材料を用い た同一条件による回転式連続プレス加工法と従来のロール成形法との比較試験を実施した。 エッジ保持時間向上においては回転式連続プレス加工法を溶接工程に適用することでエッ ジ突き合わせ状態の保持時間が向上することを確認した。エッジ安定性向上においては回 転式連続プレス加工法では接合点が長手方向には移動するが、ラインセンターに対する偏

5

差は少ないことがわかった。一方、ロール成形法は長手方向への移動に伴いラインセンタ ーからの偏差も大きくなっていることがわかった。回転式連続プレス加工法はロール成形 法に比べエッジ部の安定性は大幅に向上していると判断できた。残留応力の低減について は残留応力が大きいほど成形後の開口幅が大きくなることがわかった。

(3) 薄肉材・難加工材の成形

素材として炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、フェライト系ステンレス鋼、アル ミニウム合金、チタン板について、製品寸法として φ 45.0×0.4tから φ 114.3×4.0tについて、 難加工材や薄肉材に対する成形実験をおこなった。極薄肉材の成形については肉厚外径比 t/D=1%以下の極薄肉材に対し、バックリング(エッジ部に発生する波打ち現象)なく安定 して成形し、TIG 溶接することができた。本試験により本加工法が付加的ひずみの発生が 少なく、極めて低歪成形であることを実証した。難加工材の成形については全ての難加工 材において、無潤滑状態であっても焼き付きなく成形することができた。

1.4 当該プロジェクトの連絡窓口

〒550-0004 大阪市西区靱本町1丁目8番4号

(財) 大阪科学技術センター 付属ニューマテリアルセンター

TEL: 06-6443-5326、FAX: 06-6443-5310

- 金子輝雄 (<u>t.kaneko@ostec.or.jp</u>)
- 井出正裕 (<u>m.ide@ostec.or.jp</u>)

#### 第2章 本論

- 2.1 全体概要
  - 溶接鋼管の主要な製造方法にはロール成形法やプレス成形、スパイラル成形、ベンディングロール成形などがあるが、自動車用には生産性や設備・製造コストの面で優れているロール成形法がもっともよく採用されている。しかし、ロール成形法は次に記すロールという工具が有する特有かつ回避できない問題がある。
    - 成形ロールへの巻き付きを代表とする三次元変形の特徴が強く、トータル歪が大きく残留応力の形態も複雑で、製品の寸法精度の向上、加工硬化や残留応力の低減に限界がある。
    - 成形ロールと被成形材の接触領域が小さいので接触応力(面圧)が高く、また周 速差による相対滑りが発生するため、成形ロールの摩耗が激しく寿命が短い。

一方でプレス成形は被成形材がその断面内の2次元変形のみを受け、余分な歪と残 留応力が少ないため製品品質が高く、しかも金型と被成形材の接触応力が低く金型の 寿命が長いという特徴がある。しかし、この方式はシート材のバッチ加工であり、生 産性が悪くコスト高のため、自動車用途の溶接鋼管の製造方法には殆ど採用されてい ない。

- 2) 高品質化が容易でかつ工具の長寿命化が可能であるプレス成形の特長と、ロール 成形のような高生産性を併せ持つ新成形法の開発を目的に検討を重ねた結果、巨大 な成形ロールを採用すると、被成形材が成形ロールに巻き付く現象が大きく緩和さ れ、プレス成形の様な二次元変形に近付くことを知見した。また、巨大な成形ロー ルを使用すると、被成形材と成形ロールの接触面積が増えるため接触応力が下がり、 さらに周速差が小さくなるため、成形ロールの寿命が大幅に伸びることに着目した。
- 3) ところが、上記の巨大直径を有する成形ロールの製作は、巨大設備となることによ る物理的な制約や、製造コストの制約から実現が極めて困難である。

そこで、本研究ではプレス成形と同等の低歪で高品質な成形能力とロール成形と 同等の高生産性とを併せ持つ新成形方式として、多数の金型を無限軌道で旋回させ る金型列を用い、成形直下で剛体化した複数個の金型が仮想の巨大直径を有する成 形ロールと同等の孔型となるように構成した、新しい回転式連続プレス加工方法を 開発することを目的とした。











- 2.2 装置の具現化の研究
- 2.2.1 製作した試作試験機
- (1) 試作試験機の仕様

本加工法による、平板の被成形材を丸型形状に成形する試作試験機を製作した。 完成させた試作試験機の仕様は次のとおり。

- 1) 成形範囲 :外径 φ 38.1 ~ φ 114.3mm 肉厚 0.6 ~ 6.0mm
- 2) パスライン : FL+1100mm (管底基準パス)
- 3) 流れ方向 : 右から左
- 4) ライン速度 :最大 60m/min
- 5) 設計荷重 : 20ton
- 6) 目標剛性 : 10tonf/mm (実測 11.9tonf/mm)
- (2) 装置構成について

丸型形状への成形にはいくつかの過程(パス)があり、このうちクラスタ成形工程と溶 接工程の成形スタンドに本加工法を採用した

スタンド構成は次のとおり。また、試作試験機の外観写真を図 2.2.1 に示す。

1) EG(Entry Guide Stand)

被成形材を成形機に左右対称に挿入するようガイドする。

- PR(Pinch Roll Stand) 被成形材に成形機へ進入するための推力を与える。
- BB(Edge Bend Stand) 被成形材両エッジ部を曲げ成形する。
- 4) RVS(Reverse Bend Stand) 被成形材幅方向中央部を曲げ成形する。
- 5) CL(Cluster Stand) 被成形材全体を曲げ成形するクラスタ成形工程の回転式連続プレス加工装置。
- 6) FPS(Fin-pass Side Stand)

被成形材の幅方向寸法を規制し、次の FP への誘い込みを行う。

7) FP(Fin-pass Stand)

フィン付きの姿ロールで絞り成形を行い、被成形材の形状と周長を整える。

- フィン角度は20度とし、ここまでで94%(340度)の成形を完了させる。
- 8) WB(Weld Box)

被成形材両エッジを突き合わせて溶接を行う溶接工程の回転式連続プレス加工 装置。



1) 上流側



2) 下流側



2.2.2 工具半径の最適値探索

(1) 目的

工具(成形ロール)の半径を大きくすることにより被成形材との接触応力のピー ク値が減少するが、その一方で装置が受けるトータル荷重が増加する。そこで、溶 接工程の試作試験機を対象に、ピーク線圧とトータル荷重が良好にバランスする工 具の半径について検討する。

(2) 方法

前記試作試験機の最大負荷製品である  $\phi$  114.3×6.0t を対象に、FEM 解析を用いて工具径 が及ぼす接触応力への影響について調査する。なお、FEM 解析には中田製作所が自社 開発した解析ソフト(動的陽解法弾塑性大変形有限要素法)を用いる。

(3) 結果

FEM 解析結果を図 2.2.3 に示す。ロール成形の溶接工程では成形ロールの大きさ(半径 寸法)を製品外径の 0.5~5 倍とすることが多い。ロール半径を製品外径の約 2 倍(R200)と した場合、成形ロールとの接触により非常に大きなピーク線圧が発生している。ロール半 径を大きくしていくことにより、ピーク線圧が減少する。製品外径の約 50 倍(R5000)を超 えたところでピーク線圧はほぼ一定となり、それ以上の大径化はピーク線圧に影響を与え ないことがわかった。

本結果より、試作試験機で採用する工具半径は R2000 とすることが最適であると判断した。



図 2.2.3 工具半径がロール直下で及ぼす接触応力への影響

#### 2.2.3 金型の材質

本加工法は金型の被成形材との接触応力が低く、相対すべりも少ない。前述したとおり 溶接工程の工具半径は R2000mm を最適値として採用するが、最大負荷製品(φ114.3×6t) の線荷重のピーク値は約 800kgf/mm であり、接触応力は 4.5kgf/mm<sup>2</sup> と非常に低い。

そこで、金型の材質にはダイス鋼(SKD11)より安価なクロムモリブデン鋼を採用した。



図 2.2.4 工具直下の接触応力の分布 ( \$\phi 114.3 \times 6t YP=359MPa 工具半径 R2000mm)

#### 2.2.4 ライン速度

溶接方法として TIG 溶接を採用する場合は 0.5~3 m/min の低速なライン速度で造管する が、高周波溶接を採用する場合は 20~100 m/min の高速なライン速度が必要となる。

製作したクラスタ成形工程の試作試験機は、この広い速度域でも安定したライン速度と 駆動トルクを得るため、駆動モータには AC サーボモータを採用した。なお、主に TIG 溶 接で試成形を実施予定であったため低速側に最適化し、設計上のライン速度範囲を 0.5~ 60 m/min とした。

なお、本試作試験機を無負荷状態にてライン速度 60m/min で駆動させる高速運転の確認 試験を実施した。試作試験機から 1m 離れた位置に騒音計を設置し、各ライン速度におけ る騒音レベルを測定したところ、ライン速度 60m/min の騒音レベルは 89.5dB であった。 試験の様子を図 2.2.5 に、測定した騒音を図 2.2.6 に示す。



1) 試験の全体写真
2) 使用した騒音計
図 2.2.5 高速運転試験の様子



図 2.2.6 各ライン速度における騒音レベル

#### 2.3 金型の連結の研究

本成形法の特徴は、超大径の成形用孔型ロールを分割した形の金型を、成形時だけ連結 させることで、設備の巨大化を押さえて最小限の空間を占有する形の設備を設計すること が可能である点にある。ところで、分割した金型を用いる場合には、隣接金型間の連結が 適正に行われることが前提であるが、この前提が崩れて隣接金型間の連結が正常に行われ ない場合は隣接金型の合わせ面の間に間隙と段差が発生し、成形される管の外面がその間 に入り込んでしまい、結果として製品外面に段差や凹凸を残し、極端な場合は外面疵を誘 発する危険性がある。この様な事態の発生を抑止する手段を講ずるために、金型の連結部 に存在する間隙と段差が製品表面上の凹凸にどの様に影響を及ぼすかを弾塑性有限要素法 による解析で明らかにし、その結果の妥当性をプレス成形による実験で検証した。また、 実証機において、隣接金型間の隙間と段差を変化させた金型を装着することで、上記の結 論の妥当性の最終確認を行い、金型形状の仕上精度と剛性管理を行うことで良好な管外面 品質を確保できることを確かめた。

弾塑性有限要素解析の際に規定した隣接金型間の配置と幾何形状を図 2.3.1 に示す。隣 接金型間はbの間隙を持ち、金型表面にはcの段差があり、金型端部は長さdに亘って半 径 Rの円弧で逃がしを取った。これらb、c、d、Rをパラメータとして解析を繰り返して 鋼管の外面形状がどの様に変化するかを調査した。なお、解析に用いたソフトウェアは英 国 Rockfield 社の ELFEN である。なお、金型端部に Rを取ってある理由は、図 2.3.2 に概 念図を示す様に、端部に R が無く角部の角度が直角である場合には、端部近傍が一旦内面 方向に曲げられ、その後間隙に盛り上がりが出来ることが事前の解析の結果判明したため である。製品外面の平滑性を確保するためには、この様な内面方向への折れ曲がりは抑止 しなければならない。また、角度が直角の場合は、金型の角部が管外面に当たり、その部 分が製品外面上の疵になる危険性が高まるため、その危険性減少させるためにも、端部に Rを付与することが重要である。R の値の最適値は、本研究で扱う管製品の外径と肉厚の 寸法範囲であればほぼ一定値で、事前の探査結果によると 40mm である。



図 2.3.1 隣接金型間の間隙と段差の影響評価のための幾何学的パラメータの定義



図 2.3.2 金型端部が直角の場合に発生する特異的な材料変形と問題点

Rの大小が変形に及ぼす影響の例を図 2.3.3 に示す。金型の間隙は 0.001mm、金型間の段 差は 0.04mm、素管肉厚は 1.1mm で縮径率は 1%の場合の例である。R が 4.25mm の場合は 管が外面に向かって膨れるために、内外面に大きなひずみが発生するが、R を 40mm にす るとひずみの分布は抑制され、均一分布に近づきくことが判る。また、間隙を大きくして も、縮径率が 1%前後の値であれば、管外面が隙間に入り込むことは無く、長い d 部内で は凹凸は発生せず、単調増加するだけであることが判る。従って、管外面には段差 0.04mm の緩い勾配が存在するだけである。



図 2.3.3 金型端部のRの値が相当塑性ひずみ分布に及ぼす影響

プレスによる実験で一連の解析結果の検証を行った。試験の概要を図 2.3.4 に示す。金型は上面に 2 個、下面に 2 個が配置され、上面の金型は固定、下面左の金型位置をシムによって上下左右に調整し、段差と隙間を変更した。素管は外直径 54mm の炭素鋼であり、内部にひずみゲージを貼付し、プレス加工前後のひずみの推移を計測し、解析結果との整合性を確認した。



図 2.3.4 プレス実験の概要



図 2.3.5 管内面にひずみゲージを貼付した素管の外観写真

測定された管外面形状の例を図 2.3.6 に示すが、外径は予測通り、段差に応じて漸増す ることが判る。従って、隣接金型間の段差の値を適正に管理することが重要である。



図 2.3.6 プレス金型成形による加工後の管外径の変化の例

実証機において、加工中の金型が相対的にどの様に動くかを実測し、それが管外面寸法 に及ぼす影響を精査した。金型の幾何学的形状については、端部のdとRの寸法を適切に 設定し、また、隣接金型と金型固定治具を含む金型周辺の寸法誤差や作動の誤差を最小限 に押さえ込んだ上でその剛性を高め、圧延後の管外面形状に及ぼすその効果を評価した。 圧延時の隣接金型間の相対変位測定法の概要を図2.3.7 に示す。圧延後は、管外面性状に 対する官能検査を行い、併せて圧延材の管外径を測定した。金型製造時の寸法誤差と剛性 を適切に管理することにより、製品の外面性状を安定化させることが出来る。隣接金型間 で発生する圧延材の外径変化を0.03mm程度まで押さえ込んだ場合の例を図2.3.8 に示すが、 なだらかな外径変動が観察され、官能検査結果も良好である。管外径の寸法仕様に応じて 隣接金型間の相対的な凹凸を適正化すれば、美麗な外表面の管を得ることが出来る。





図 2.3.8 金型寸法精度と剛性の適正化が管外表面性状に及ぼす効果の例

なだらかか否かを問わず、管外面の段差形成は、ある意味で金型のエッジ部分での局所 加工が存在する危険性を示唆する。圧延された管外面の性状から、この様な危険性は低い と思われたが、結晶塑性有限要素法を用いて、外径絞り加工時のミクロ組織内の局所的な ひずみの分布状態を推定した。結果の一例を図 2.3.9 に示す。段付部の近傍では、変形初 期から、平均値より大きな塑性ひずみが発生しているが、その領域は圧縮加工の進展に伴 って拡大はせず、またその塑性ひずみの値が異常増加せず安定推移している。以上から、 極小さな段差が金型端部に存在する場合に、その段差が製品である鋼管の表面に押し込ま れることで、致命的な損傷の鋼管外表面近傍での発生は、先ず無いと考えられる。



 $D = 6\Delta x$ モデル $D = 12\Delta x$ モデル $D = 24\Delta x$ モデル図 2.3.9ミクロ解析による局所的なひずみ集中の解析(相当塑性ひずみ分布)

2.4 成形機能の向上効果

2.4.1 低歪(高延性)鋼管の製造

(1) 目的

外径(D)、肉厚(t)の鋼管を製造する場合、平板から管形状へ成形する為に必要な理論上の 最小成形歪み量は t/D となる。ところが、従来のロール成形法では成形ロールへの巻き付 き等により、一般的に t/D の 3 倍以上の歪が発生する。

製作した試作試験機を対象とした FEM 解析を行い、高延性のステンレス鋼管(成形歪が t/Dの1.5倍以下の鋼管)が製造可能であることを確認する。

(2) 方法

表 2.4.1 に示す薄肉材と厚肉材の2種類のケースについて FEM 解析を実施した。FEM 解 析には中田製作所が自社開発した解析ソフト(動的陽解法弾塑性大変形有限要素法) を用いた。

1) $\phi 63.5 \times 1.48$			
製品寸法	φ 63.5×1.48		
素材	炭素鋼		
降伏点応力	224MPa		
加工硬化指数	n=0.5467165		
総要素数	954,720		

表 2.4.1 解析条件

2) $\phi$ 63.5×3.23t			
製品寸法	φ 63.5×3.23t		
素材	炭素鋼		
降伏点応力	396MPa		
加工硬化指数	n=0.2175891		
総要素数	1060.800		

(3) 結果

成形過程で生じる相当塑性歪を FEM 解析により評価したところ、薄肉材、厚肉材共に目 標値である t/D の 1.5 倍以下を達成していることを確認した。各スタンド出側における被 成形材に生じた相当塑性歪の断面内平均値を表 2.4.2 に示す。また、相当塑性歪の分布を 図 2.4.1 に示す。

ケース スタンド	φ 63.5×1.48	φ 63.5×3.23t	
EB	0.48	1.12	
RVS	0.54	1.31	
ODF	1.42	3.36	
FP	2.39	4.96	
(目標値)	(3.49%以下)	(7.63%以下)	

表 2.4.2	断面内の相当塑性歪の平均値



1) φ 63.5×1.48t の相当塑性歪



2) φ 63.5×3.23t の相当塑性歪

図 2.4.1 相当塑性歪の分布

#### 2.4.2 成形機能向上

溶接工程を対象に、巨大工具径による成形の改善効果を確認するため、同一材料を用い た同一条件による回転式連続プレス加工法と従来のロール成形法との比較試験を実施した。 試験装置を図 2.4.2 に示す。



(a) 回転式連続プレス成形法

(b) ロール成形法

図 2.4.2 溶接工程の比較試験の試験装置

(1) エッジ保持時間向上

回転式連続プレス加工法を溶接工程に適用することでエッジ突き合わせ状態の保持時間 が向上することを確認した。図 2.4.3 にエッジ突合せ状況を撮影した写真を示す。(a)は本 加工法を溶接工程に適用した場合の写真である。(b)に示すロール成形と比較し、保持時間 が大幅に長くなっていることが判る。

別途ロールに発生する反力から計算した塑性領域の大きさから判断して、突き合わせ状況を保持している距離は約20倍以上になっているものと考えている。



(a) 回転式連続プレス成形法(b) ロール成形法図 2.4.3 エッジ突合せ状態の保持時間の比較

(2) エッジ安定性向上

(2.1) 目的および方法

回転式連続プレス加工法をスクイズ成形工程に適用することでエッジの安定性が向上す ることを確認する。確認方法としては、両エッジの突き合せ部を CCD カメラで撮影し、 OpenCV (オープンソースの画像処理ライブラリ)を使用して画像処理することにより両 エッジが接合する点を予測する。その接合点の移動状況を数値化し評価する。画像処理の 状況を図 2.4.4 に、評価方法を図 2.4.5 に示す。



(a) 回転式連続プレス成形法(b) ロール成形法図 2.4.4 OpenCV を使った画像処理にて予測したエッジ部接合点



図 2.4.5 エッジ部接合点の数値化

(2.2) 結果

評価結果を図 2.4.6 に示す。回転式連続プレス加工法では接合点が長手方向には移動す るがラインセンターに対する偏差は少ない。いくつかの点が離れた位置にあるが、実際に 実際の偏差なのか画像処理の誤差なのかは不明である。

一方、ロール成形法は長手方向への移動に伴いラインセンターからの偏差も大きくなっている。また偏差の方向も一定ではないため、ねじれを発生させていることが考えられる。 つまり、ロール成形法では被成形材との接触が長手方向位置に対しては1断面になるため、 被成形材がその接触位置を支点にして"ねじれ"のような状況になっていると思われる。

また、図 2.4.7 におけるラインセンターに対する接合点の偏差のヒストグラムを図 2.4.6 に示す。これらの結果から、回転式連続プレス加工法はロール成形法に比べエッジ部の安 定性は大幅に向上していると判断できる。



#### (3) 残留応力の低減

回転式連続プレス加工法とロール成形法にて加工された被成形材の開口幅を評価した。 被成形材は加工後内部に残留する弾性変形の量に応じて元に戻ろうとする現象が発生する。 この内部に残留している弾性変形のことを残留応力とよび、残留応力が大きいほど成形後 の開口幅が大きくなる。それぞれの加工法における成形後の開口状況を図 2.4.8 に示す。



(a) 回転式連続プレス成形法(b) ロール成形法図 2.4.8 成形方法の違いによる成形後の開口状況

成形時の絞り量と成形後の開口幅の関係を図 2.4.9 に示す。同等の絞り量であれば回転 式連続プレス加工法はロール成形法に比べ成形後の開口幅が小さくなっていることが分か る。このことから、回転式連続プレス加工法はロール成形法より残留応力を低減できてい ると評価できる。



図 2.4.9 成形方法の違いによる絞り量と開口幅の関係

#### 2.4.3 薄肉材・難加工材の成形

#### (1) 実施した成形試験

本試作試験機を用いて表 2.4.3 に示す試成形を行った。結果は同表のとおり様々な寸法、 素材において良好な成形が実施できた。

製品寸法	素材の種類	成形状況
	銅合金	バックリングおよび焼き付きなく
$\phi$ 45.0 × 0.4t	C1220R-1/2H	成形できた
	炭素鋼	試作試験機の負荷能力に問題なく
$\phi$ 45.0 × 3.2t	SPHC	成形できた
1 45 0 1/4 5/	炭素鋼	試作試験機の負荷能力に問題なく
$\phi$ 45.0 $\times$ 4.5t	SPHC	成形できた
\$ 62 5×0 6t	オーステナイト系ステンレス鋼	バックリングおよび焼き付きなく
φ 05.5×0.0t	SUS304	成形できた
+ 62 5 0 64	フェライト系ステンレス鋼	バックリングおよび焼き付きなく
φ 03.3×0.01	SUS430LX	成形できた
± 62 5×1 19+	炭素鋼	問題なく出形できた
φ 05.5×1.48t	SPCC	同題なく成形でさた
	アルミニウム合金	焼き付きなく成形できた
φ 05.5×1.0τ	5052R-H32	
± 62 5×2 02+	炭素鋼	問題なくは形できた
φ 05.5×5.25t	SPHC	问題なく成形でさた
$\pm 114.2 \times 0.5t$	オーステナイト系ステンレス鋼	バックリングおよび焼き付きなく
φ114.3 × 0.3t	SUS304-2B	成形できた
$\pm 114.2 \times 0.7t$	オーステナイト系ステンレス鋼	バックリングおよび焼き付きなく
φ114.3 < 0.7τ	SUS304-2B	成形できた
φ 114.3×3.0t	アルミニウム合金	焼き付きなく成形できた
		焼き竹さなく成形できた
	アルミニウム合金	焼き付きなく成形できた
φ114.3 ~ 4.01		
φ 63.5×1.0t	チタン	焼き付きなく成形できた
	TP270	施されさなく风形でさた

表 2.4.3 実施した成形試験

(2) 極薄肉材の成形

(2.1) 試験方法

試作試験機で薄肉材の成形試験を行い、問題無く成形し、溶接できることを確認する。 試験に用いた被成形材は表 2.4.4 のとおり。なお、本試成形ではクラスタ成形工程の成形 装置のみ回転式連続プレス加工法を採用し、溶接工程は通常のロール成形スタンドを使用 した。

表 2.4.4 成形試験を実施した試験材

No.	製品寸法	t/D(肉厚外径比)	素材の種類
1	$\phi$ 114.3 $\times$ 0.7t	0.61%	オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304-2B)
			(305304-2B) オーステナイト系ステンレス鋼
2	$\phi$ 114.3 $\times$ 0.5t	0.44%	(SUS304-2B)

#### (2.2) 試験結果

肉厚外径比 t/D=1%以下の極薄肉材に対し、バックリング(エッジ部に発生する波打ち現象)なく安定して成形し、TIG 溶接することができた。本試験により本加工法が付加的ひずみの発生が少なく、極めて低歪成形であることを実証した。試作した鋼管を図 2.4.10 に、 試験の様子を図 2.4.11 に示す。



図 2.4.10 試作した鋼管



1) クラスタ成形工程下流側



2) 溶接工程

図 2.4.11 試験の様子

(3) 難加工材の成形結果

(3.1) 試験方法

試作試験機で各種難加工材(表 2.4.5)を無潤滑状態で成形し、成形後の被成形材外表面品 質を評価する。

No.	製品寸法	素材の種類	規格
1	φ 45.0×0.4t	銅	C1220R-1/2H
2	φ 63.5×1.0t	チタン	TP270
3	φ 63.5×1.6t	アルミニウム合金	5052R-H32

表 2.4.5 成形試験を実施した試験材

(3.2) 試験結果

全ての難加工材において、無潤滑状態であっても焼き付きなく成形することができた。 被成形材の表面状態を図 2.4.12 に示す。



1) *ϕ*45.0×0.4t (銅)



2) φ63.5×1.0t (チタン) 図



3) φ63.5×1.6t (アルミニウム合金)
図 2.4.12 試作した鋼管

第3章 全体総括

株式会社中田製作所が考案した「鋼管製造における回転式連続プレス(プレスフォーミング)加工法」に国立大学法人京都工芸繊維大学が研究開発した金型の連結方法のノウハ ウを加味して研究開発を行い、試作した実機において各種材料の成形試験を行い種々の成 果を得た。

(1) 製作した試験機の仕様は

・成形範囲:外径 φ 38.1~ φ 114.3mm 肉厚0.6~6.0mm、パスライン:FL+1100mm(管底基準パス)、流れ方向:右から左、ライン速度:最大 60m/min、設計荷重:20ton、目標剛性:
10tonf/mm(実測11.9tonf/mm)である。

(2) 装置の具現化においては

FEM解析を行いつつ検討を進め、ロール半径を大きくしていくことにより、ピーク線圧 が減少する。製品外径の約50 倍(R5000)を超えたところでピーク線圧はほぼ一定となり、 それ以上の大径化はピーク線圧に影響を与えないことがわかった。この結果より試作試験 機で採用する工具半径はR2000 とすることが最適であると判断した。金型の材質にはダイ ス鋼 (SKD11) より安価なクロムモリブデン鋼を採用した。またライン速度範囲を0.5~60 m/min とした。

(3) 金型の連結については

本成形の特徴は、超大径の成形用孔型ロールを分割した形の金型を、成形時だけ連結さ せることで設備の巨大化を抑えて、最小限の空間を占有する形の設備を設計することが可 能である点にある。金型の連結部に存在する間隙と段差が、製品表面上の凹凸にどのよう に影響を及ぼすかを弾塑性有限要素法による解析で明らかにし、その結果の妥当性をプレ ス成形による実験で検証した。また実証機において、隣接金型間の間隙と段差を変化させ た金型を装着することで、上記の結論の妥当性の最終確認を行い、金型形状の仕上げ精度 と剛性管理を行うことで良好な管外面品質を確保できることを確かめた。

圧延後は管外面性状に対する官能検査を行い、あわせて延材の管外径を測定した結果、 なだらかな管径変動が観測され、官能検査も良好であった。管外径の寸法仕様に応じて隣 接金型間の相対的な凹凸を適正すれば、美麗な外表面の管を得ることができることが判明 した。

(4) 成形機能の向上効果

低歪(高延性)鋼管の製造においては、製作した試作試験機を対象としたFEM 解析を行い、高延性のステンレス鋼管(成形歪がt/D の1.5 倍以下の鋼管)が製造可能であることを確認した。成形過程で生じる相当塑性歪をFEM 解析により評価したところ、薄肉材、 厚肉材共に目標値であるt/D の1.5 倍以下を達成していることを確認した。

成形機能向上においては、溶接工程を対象に、巨大工具径による成形の改善効果を確認

27

するため、同一材料を用いた同一条件による回転式連続プレス加工法と従来のロール成形 法との比較試験を実施した。回転式連続プレス加工法はロール成形法に比べエッジ部の安 定性は大幅に向上していると判断できた。残留応力の低減については残留応力が大きいほ ど成形後の開口幅が大きくなることがわかった。

(5) 薄肉材・難加工材の成形

素材として炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、フェライト系ステンレス鋼、アル ミニウム合金、チタン板について、製品寸法として φ 45.0×0.4tから φ 114.3×4.0tについて、 難加工材や薄肉材に対する成形実験をおこなった。極薄肉材の成形について、本試験によ り本加工法が付加的ひずみの発生が少なく、極めて低歪成形であることを実証した。難加 工材の成形についても全ての難加工材において、無潤滑状態であっても焼き付きなく成形 することができた。