

平成29年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「アルミニ難加工材・テーパ管の一体成形加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人浜松地域イノベーション推進機構

目次

第1章 研究開発の概要

1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1－2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	2
1－3 成果概要	3
1－4 当該研究開発の連絡窓口	4

第2章 本論

2－1 塑性加工と熱処理の一貫加工ラインの開発	5
2-1-1 一貫加工ラインの構成	5
2-1-2 急速加熱アルミ熱処理炉の開発と最適熱処理条件の研究	6
2-1-3 インライン時効炉の開発と最適時効条件の研究	8
2－2 インテリジェントベンダーの開発	9
2-2-1 テーパ管加工の加工点研究（1）～動作の見える化～	9
2-2-2 テーパ管加工の加工点研究（2）～制御の見える化～	10
2-2-3 加工精度測定の高度化	12
2-2-4 インテリジェントベンダーの開発	12
2-3 アルミ難加工材・テーパ管の曲げ解析技術の確立	13
2-3-1 基礎データの収集と解析	13
【A】 テーパ管の曲げ解析技術の確立	13
【B】 基礎データの収集と解析	14
2-3-2 A7000系アルミ・テーパ管のシミュレーション解析	15

第3章 全体総括	19
----------	----

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

自動車の燃費や操縦安定性等の向上の為、軽量・高強度な先進部材として高強度のアルミニウム材の導入が加速している。A7000系アルミ管を使用した二輪車用の高強度アルミ・テーパーハンドルは、ユーザーが求めるデザイン性の高さと、軽量・高剛性といった高機能性を併せ持ち、近年欧米向け大型二輪車を中心に市場での採用が飛躍的に拡大している。また、近い将来には東南アジア市場等の小型二輪車への波及も予想され、更なる規模拡大が見込まれる。

A7000系アルミは高強度を誇る反面、加工性の悪さから特にパイプ材を使った複雑形状製品の量産加工技術の確立が遅れている。このため、高価なハイドロフォーミングマシンの使用や、パイプの曲げ加工前昇温/曲げ加工の低速化等による生産性の低下を余儀なくされている。また、高強度であっても鋼管に比べ曲げ加工中の偏平やキズ付が発生しやすく、後工程での仕上げ工数増大につながる傾向にある。テーパ管の曲げ加工は直管に比べ加工時の変形挙動が複雑で、作業者の経験と勘に頼る部分が多く、安定的な加工ができていない。加えて、熱処理型アルミの宿命として、自然時効特性により硬度が刻々と変化し、曲げ加工性が変化して行くことも、安定的な生産を阻害する要因となっている。

塑性加工の解析にシミュレーション解析を活用する事例は多いが、アルミ・テーパ管の曲げ解析はニッチな領域であり余り例を見ない。国立大学法人静岡大学の早川教授に簡易的なシミュレーション解析手法を確立していただき、シミュレーションと実作業による検証を組み合わせることで研究活動を加速することができた。

熱処理型アルミの精密加工において熱処理時の変形並びに矯正が大きな課題となる。工程設計の優劣が、Q(品質)・C(コスト)・D(納期)の優劣に直接影響を及ぼすことから、実戦的な成果を目指す為に一貫加工ラインの構築を本研究の中核課題とした。

以上の背景・研究目的から次の3つの課題を掲げ、すべてを達成することができた。

- 【1】塑性加工と熱処理の一貫加工ラインの開発
- 【2】インテリジェントベンダーの開発（加工状態監視と曲げ条件の最適化）
- 【3】アルミ・テーパ管の曲げ加工シミュレーション技術の開発

各課題に対する目標値と達成状況は、表1-1の通りである。【1】、【2】、【3】の成果を総合して、多品種少量・短納期・低コストに対応できる生産技術を確立した。

表1-1 目標と達成状況

課題	目標値	達成状況
【1】塑性加工と熱処理の一貫加工ラインの開発	①製造リードタイムを1/2に短縮	○
	②製品重量を30%軽量化	○
	③製造コストを30%低減	○
【2】インテリジェントベンダーの開発（加工状態監視と曲げ条件最適化）	④曲げ加工時間を1/2に短縮	○
	⑤曲げ加工中のトラブルゼロ	○
【3】アルミ・テーパ管のシミュレーション技術の開発	⑥段取り時間を1/2以下に短縮	○
	⑦試加工数を1/4以下に削減	○
	⑧生産準備に活用出来る	○

1－2 研究体制

① 研究組織・管理体制

本研究開発事業は、1民間企業と1大学の2機関からなる。関東経済産業局から戦略的基盤技術高度化支援事業に対する補助金の、交付決定を受けた補助事業者（事業管理機関）である公益財団法人浜松地域イノベーション推進機構が、実際の研究開発に携わる間接補助事業者の鈴覚株式会社と国立大学法人静岡大学を管理し全体の事業を推進した。図1-1-1は、本プロジェクトの管理体制を示す。研究全体を総体的に管理するプロジェクトリーダー（PL）とそのフォローをするサブプロジェクトリーダー（SL）を設け、アドバイザーを含めた全体で行う研究開発推進委員会と、効率的に事業を進める為の研究実務者会議を開催した。

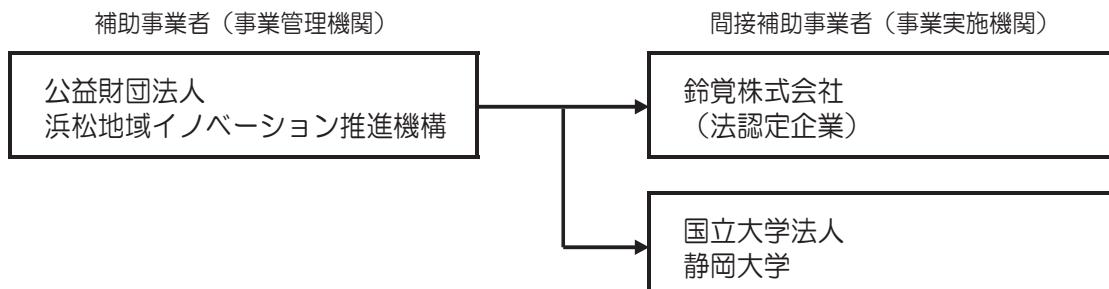


図1-1-1 管理体制

② 研究者氏名

鈴覚株式会社

氏名	所属・役職
辰巳 晴夫	取締役 統括研究代表者（PL）
山田 和人	副部長
田口 博嗣	係長
持塚 淳也	課員
栗野 健太	課員
中山 阜也	課員

国立大学法人静岡大学

氏名	所属・役職
早川 邦夫	大学院教授 副統括研究代表者（SL）

③ 協力者（アドバイザー）

氏名	所属・役職
伊藤 芳典	静岡県工業技術研究所 浜松工技支援センター 材料科 科長
木村 嘉浩	ヤマハ発動機株式会社 材料技術部 部長
奥田 裕也	ヤマハ発動機株式会社 材料技術部 主事
馬場 康博	千代田工業株式会社 工場長

1-3 成果概要

1-3-1 塑性加工と熱処理の一貫加工ラインの開発

塑性加工設備としてスエージングマシンとパイプベンダー、熱処理装置として溶体化炉と時効炉。この4つの設備を主要コンポーネントとして一貫加工ラインを構築した。アルミ管は、両側テーパ加工を施された後、溶体化処理のため連続炉に投入され、処理直後の最も曲げ易い状態で曲げ加工に入る。加工後の人時効で所定の強度となり一貫加工を終了する。

本ラインの中核をなすのは溶体化炉（連続炉）とパイプベンダーで、特に溶体化炉は、熱処理条件（時間）が設備のサイズに影響を及ぼすことから、材料の最適熱処理条件探求と、設備開発を並行して進めた。また、溶体化後の水冷時にアルミ管が変形しない様に様々な工夫を凝らした結果、加工精度を満足する最適な条件で曲げ加工に入れる様になった。これらの積み重ねで、リードタイム、軽量化、製造コストの各目標を達成することができた。



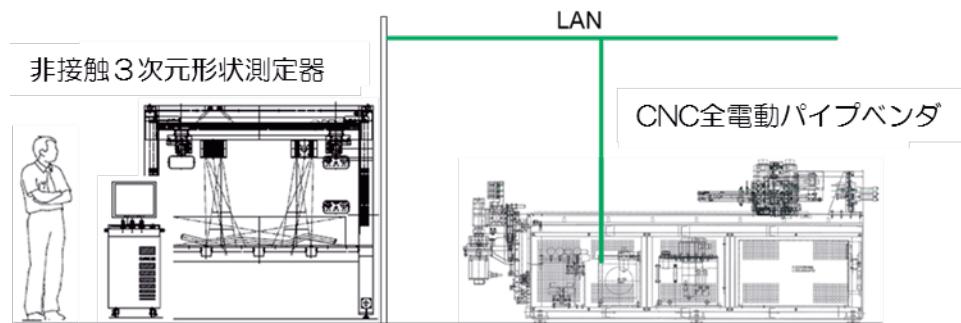
1-3-2 インテリジェントベンダーの開発

当初の目標は、曲げ加工の状態監視とフィードバック、及び曲げ条件の精密な設定が可能なベンダー開発であったが、実加工時間の短さ（1.5秒～2秒）と、アルミの破断が瞬時に完結することから、変化を先読みするフィードフォワード方式へ変換した。

研究開始当初から曲げ加工の加工点研究に注力した。定点ビデオ撮影に始まった加工点研究は全電動型のパイプベンダーに改造を加え、サーボの出力特性を解析することで一気に見える化が進んだ。熱処理条件と一貫加工ラインにより割れのトラブルを抑えた結果、最終的に、ベンダーで注視すべきことをスプリングバック量と定め、ロット間やロット内で発生する、主に硬度のばらつきに起因する曲げモーメントの変化に対応できる仕組みを構築した。

最終的に到達した仕組みはベンダーと非接触型の3次元形状測定器の組み合わせで、両設備はLANケーブルで接続される。形状測定器で計測されたデータはLANでベンダーに送られ最適な曲げ条件が選定され、ロット間のばらつきに、対応する。経時的に発生するロット内のばらつきに対しては、ベンダー内蔵のソフトで条件を自動的に切り替えて対応する。概念設計を基に設備一式を完成させ個別の機能確認を終えた。全体を通じた運用の確認と改善は今後の課題である。ロット内のばらつきは主に経時変化によって生じるため、一貫加工ラインでは問題にならないが、熱処理をバッチ処理で行う場合には有効なツールとなる。

インテリジェントベンダーの仕組み



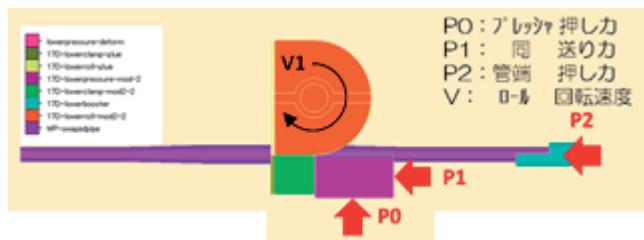
1-3-3 アルミ・テーパ管のシミュレーション技術の開発

ベンダー加工機の高度化を図るために、テーパ管をベンダーで曲げる際に作用させる圧力を適切に制御する必要がある。圧力の大きさや時間変化の最適値を、解析によりあらかじめ予測すべく、塑性加工用ソフトウェア simufact forming13 を用いてテーパ管のベンダー曲げ過程を解析した。テーパ管ベンダー曲げ解析モデルを下図の如く定め、プレッシャー型の押し圧 P_0 、同送り圧 P_1 、管端の押し圧 P_2 及び、ロール回転速度 V を制御要素とした。

解析モデルは工具と素材（テーパ管）からなり、素材はアルミ合金の弾塑性体材料モデル、工具は変形しない剛体と仮定した。曲げ解析と並行してアルミ合金の成形性評価を実施した。A 7000 系の薄板の入手が不可能で有った為、A6061 材とA2000 系材を用いて成形限界線図を取得した。A2000 系は、曲げ加工時（溶体化直後）のテーパ管の強度・延性と同程度の特性を持つと思われる。初年度にテーパ管のシミュレーション技術を確立し、2 年度からは研究活動の場で実戦的に活用し、偏平解析や曲げ加工部の断面解析に力を発揮した。特に L18 直交表を用いた実験計画法では、各圧力の偏平への寄与率を解析し、実際の曲げ加工の改善に大きく寄与するところとなった。

当初研究に使用したベンダーが油圧制御型であったため、圧力の時刻歴を設定せず、加工中常に圧力が一定に作用するものとした。「インテリジェントベンダーの開発」の中でベンダーを全電動型に変更し、各部を位置制御型としたため、本来ならばそれに沿ったシミュレーション技術の変更を行うべきところであるが、本研究では当初の設定のままに留めた。なお、インテリジェントベンダーからの位置および荷重情報を活用することにより、より高精度な解析が容易となり、今後新たな形状の製品開発における期間短縮、低コスト化が見込めることがわかった。

テーパ管ベンダー曲げ解析モデル



1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人 浜松地域イノベーション推進機構
事業推進部 米谷俊一
〒432-8036 静岡県浜松市中区東伊場二丁目7番1号
浜松商工会議所8階
TEL : 053-489-8111 FAX : 053-450-2100
E-mail : kometani@hai.or.jp

第2章 本論

2-1 塑性加工と熱処理の一貫加工ラインの開発

2-1-1 一貫加工ラインの構成

研究開始当初、A7000系アルミ（開発材）テーパ管の曲げ加工トラブルに直面し、曲げ加工を上手く行うためには、テーパ加工と曲げ加工の2つの塑性加工を、工程的にどの様に配置するべきか検討する必要があった。アルミ・テーパハンドル製造の初工程（スエージ加工）は、Φ28.6の直管をテーパ加工し、管端部をΦ22.2に絞る。この時生じる加工硬化/残留応力が後工程の曲げ加工に悪影響を及ぼすことを懸念した。図2-1-1に残留応力計測装置と測定結果を示す。結果は30MPa程度の圧縮残留応力であり、次工程に悪影響を与えるものではないと判断した。同様に加工硬化の程度も5~7%にとどまっており、こちらも問題なしと判断した。

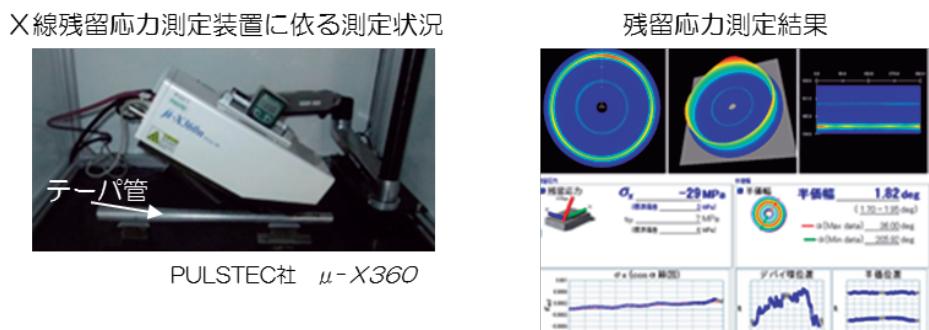


図2-1-1 残留応力計測装置と測定結果

加工順序の設定が、加工性（品質）、コストに影響を及ぼすことから、可能性のある組合せ毎に試加工を行い、工程順序を設定した。図2-1-2に検討結果を示す。

凡例	工程順序					検討結果		
		加工性	コスト	備考				
①スエージ加工	①	△	△					
②曲げ加工	③	◎	○					
③溶体化	②	X	△					
④人工時効	④	(△)	(◎)	低強度材に可能性				
D案	③	④	①	②				

図2-1-2 工程順序の検討

これらの検討を経て、塑性加工と熱処理の一貫加工ラインの構成を決定した。図2-1-3に一貫加工ラインのレイアウトを示す。研究用の加工ラインであるので、設備間の距離等は余裕を持たせて、いろいろな工程トライに対応できる様にした。

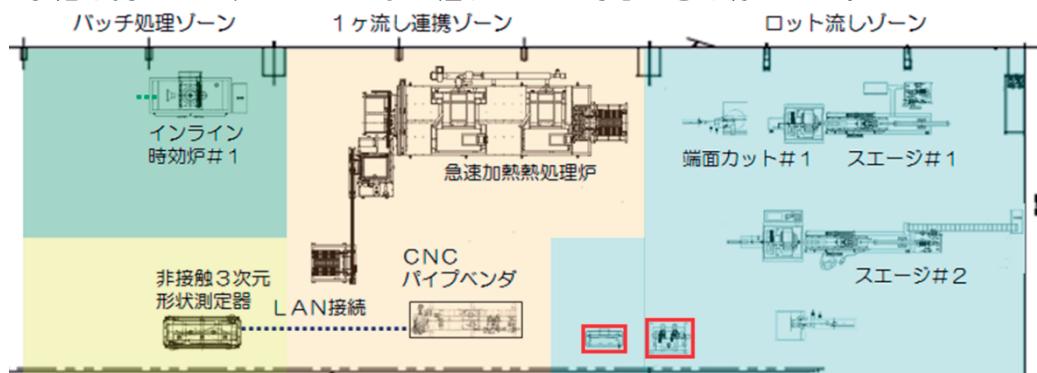


図2-1-3 一貫加工ラインレイアウト

2-1-2 急速加熱アルミ熱処理炉（溶体化炉）の開発と最適熱処理条件の研究

一貫加工ラインの中核である急速加熱アルミ熱処理炉（以下、溶体化炉と呼ぶ）の開発に当たり、以下の様に設計要件をまとめた。

◆ワーク形状

両側テーパ管として、図 2-1-4 の形状・寸法を扱える設定とした。2輪車用ハンドルのほぼ全種類の処理が可能である。

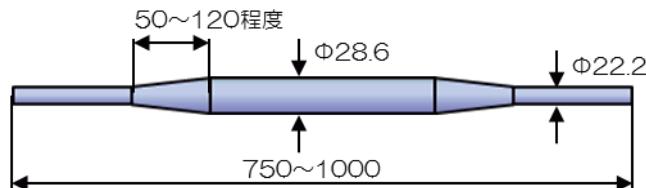


図 2-1-4 両側テーパ管の寸法 (単位: mm)

◆溶体化処理能力

材料メーカー、川下メーカーと協議の上、以下の要求性能を定めた。

- 急速加熱能力：常温から溶体化温度まで 10 分以内に昇温。
- 保温性能：溶体化温度 ± 5°C 以内で温度保持可能。
- 均熱性能：両側テーパ管各部の温度が均一である事。
- 急速水冷性能：溶体化後ただちにテーパ管を水没、水冷時の有害な変形なきこと。

◆処理速度 (CT)

- 前後工程と同期させる為、60 本/hr の処理が可能なこと。

◆構造設計

- コンベア方式とし、搬送コンベアは 1 ステージずつ間欠的に漸進する。図 2-1-5 に構造概念図を示す。



図 2-1-5 溶体化炉の構造概念図

- 図 2-1-6 に示す様に、事前にテスト炉にて予備テストを重ね、「熱風吹き出し口 ⇌ ワーク間距離」「熱風吹き出し流速」といった昇温性能に直接影響を与えるパラメータを決定し、所定の昇温性能を得た。

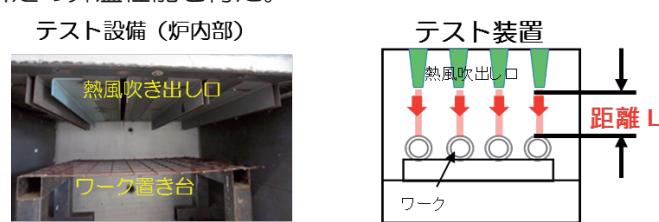


図 2-1-6 昇温ステージの予備試験

- 溶体化炉は「ワーク投入部」「急速昇温部」「保温部」「水冷・ワーク取り出し部」の 4 つの部位からなる。熱源は、2 基の LPG バーナーで、昇温用と保温用に 1 機ずつ

使用する。図 2-1-7 に溶体化炉全景を示す。

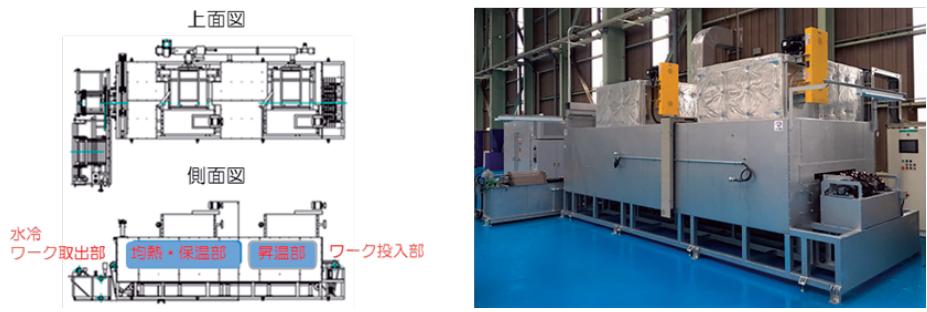


図 2-1-7 溶体化炉全景

◆細部構造設計

- コンベア：アルミニウムの溶体化温度は融点の約 75%に達するので、両側テーパ管の外形寸法差による変形の発生を防ぐ構造（図 2-1-8）とした。

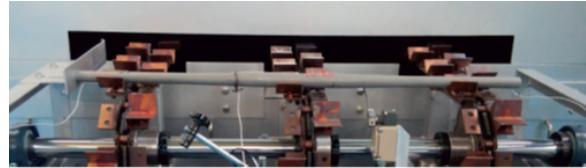


図 2-1-8 コンベアと均熱性調査の状況

- シャッター：所定の溶体化温度で均熱・保温の後、急速に取り出し水冷するため、ワーク取り出しをシャッター構造とした。当初、シャッター部から外気が侵入し、均熱終了間際に温度が低下する傾向があったが、構造を見直し対処した。
- 水冷部：コンベア搬送と並んで、変形が危惧される工程で、個別の事前テストを積み重ねた。中空パイプの水冷は、内部の高温空気と水の置換の具合により、1m のパイプ端部の反りを約 70mm にさせたこと（図 2-1-9、図 2-1-10）もあったが、投入方法を工夫することにより変形をほぼゼロにできた。



図 2-1-9 水冷試験とアルミ管の変形量

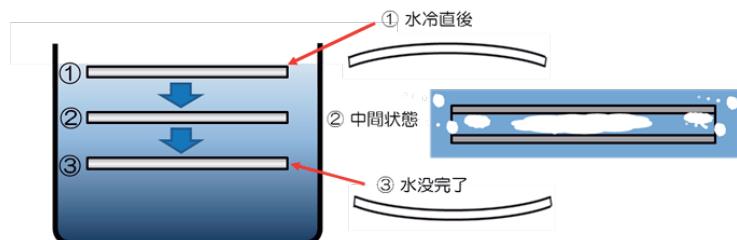


図 2-1-10 アルミパイプ水冷時の挙動観察結果

- 反り/キズレスの水槽設計：事前テスト結果から反りの少ない投入方法、投射角、速度等を定めた（図 2-1-11）。同時に、次工程の曲げに最善の形（反り 1mm 以下）で供給できるように冷却水温を設定した。

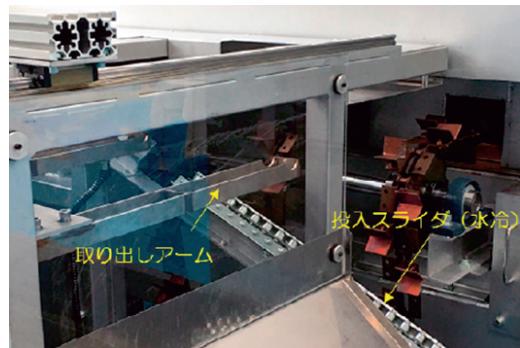


図 2-1-11 ワーク取り出しと投入のメカニズム

- ・事業化を見据えた効率化改造：溶体化炉前後にワーク自動投入装置と自動搬出・搬送装置（図 2-1-12）を設計・製作した。



図 2-1-12 溶体化炉とベンダーをつなぐ搬出・搬送装置

2-1-3 インライン時効炉の開発と最適熱処理条件の研究

溶体化炉が工程間同期型の連続炉であるのに対し、時効炉は長時間のバッチ処理炉となる。前後工程のロットサイズ、スペース効率、炉内均熱性等を勘案し、市販の電気炉をベースとして専用時効炉（図 2-1-13）を作成した。時効炉内の 9 点の温度を測定し、炉内全域で時効温度±5°C以内になることを確認した。



図 2-1-13 時効炉外観と炉内の様子（時効台車）

最適熱処理条件を考えるに当たって、2 つのことに着目した。ひとつは高強度アルミニウム合金としての性能（引張強度、韌性、耐 SCC 性 等）であり、もうひとつは二輪車の車体部品としての車両適合性である。車両適合性は、最終的には実走行試験によって操縦性や快適性として評価されるが、路面の条件や車両の特性に加え、ハンドル固有の性能（軽量化や形状の効果等）が相俟って最適値が決まって来る。本研究に於いては自社製ハンドル試験機を作製し、実走行試験前の事前評価に用いた。データが増えるに連れて、ハンドル評価の主要な物差しのひとつとして定着した。

競合サンプルを含む台上試験データの蓄積と、実車評価や販売店評価と突き合わせる事で、最適範囲を浮き彫りに出来た。図 2-1-14 に車両適合性評価のイメージ図を示す。川下メーカーからの合否判定のみに頼らず、ハンドルメーカーとして、独自に概要を把握し、改善するためのツールであると考えた。

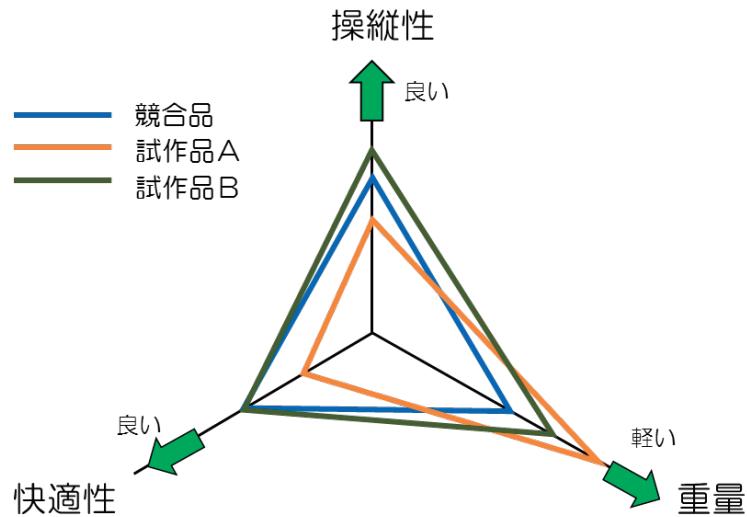


図2-1-14 車両適合性評価結果のイメージ図

試作品Aは、競合品比30%以上の軽量化を達成したが、車両適合性上「否」の判定になった。試作品Bは、軽量化と車両適合性のバランスが良く、競合品比17%の軽量化となった。併せて、時効条件毎にテストを実施し、最終的に時効時間を半減させた。

2-2 インテリジェントベンダーの開発

図2-2-1にベンダーの主要部位名称と制御因子を示す。部位名称は鈴覚（株）において日常使用している名称に統一した。 P_0 、 P_1 、 P_2 、 V を主要なセッティング要素として研究を進めた。初年度と2年度の研究に於いては、油圧駆動型のベンダーを使用しており、 P_0 、 P_1 、 P_2 、 V の各要素は、曲げ工程全期間を通じて基本的に一定として捉えた。全電動型ベンダーを2年度末に導入した後は、各要素の変動を捉えることを研究の主眼とした。なお、本研究においてはテーパ管の大径側から小径側に向けて曲げ加工を行なった。

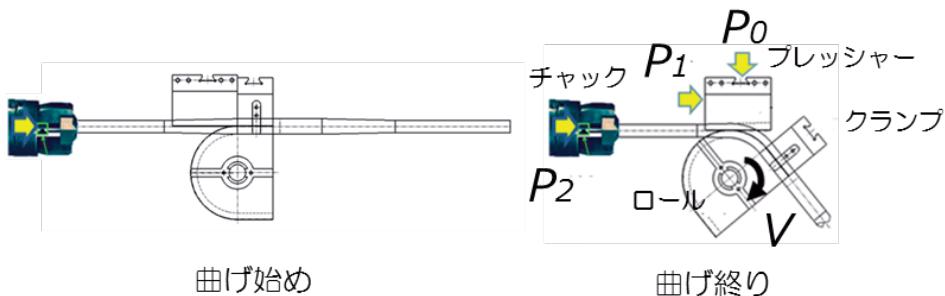


図2-2-1 ベンダー各部の名称と制御因子

2-2-1 テーパ管加工の加工点研究（1）～動作の見える化～

加工点研究に当たって、ベンダーの上部にビデオカメラ（鳥の眼ビデオと称した）を固定し、曲げ動作の観察から始めた（図2-2-2）。定量的な観察には至らず、或る意味で稚拙な試みではあったが、活動初期に皆で情報を共有し、気付いたことを確認し合ったことが、後の活動の火付け役となり大変有効だった。



図2-2-2 曲げ加工点観察会（左）鳥の眼ビデオ画像（右）

加工点研究での主な気づき：

- ◆プレッシャーの移動量Cがロール周長 A に対し少なかった。テーパ管との間に相対滑りが発生。形状、曲げの条件によっては移動量が逆転する場合もあった（図 2-2-3）。



図 2-2-3 プレッシャー型の移動量調査

- ◆テーパ管とプレッシャー型の当り（静的）の変化。加圧力、型材質による影響大（図 2-2-4）。

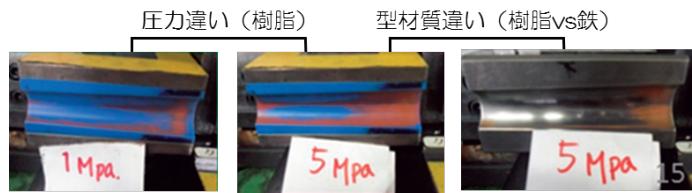


図 2-2-4 テーパ管とプレッシャー型の当り状況

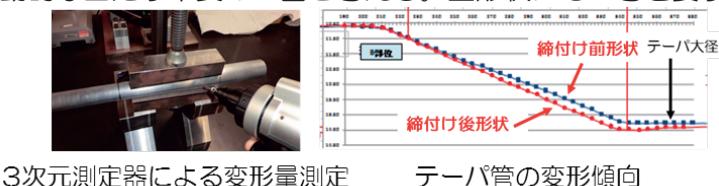
- ◆テーパ管とプレッシャー型の当り（動的）の変化。テーパ管の変形挙動による影響大。初期のシミュレーション解析（接触解析）で、曲げ加工後半でテーパ管とプレッシャー型の接触が無くなるとの情報が得られた。（図2-2-4）



曲げ開始時の接触状態（良好） 曲げ終了時の接触状態（接触無し）

図 2-2-4 テーパ管とプレッシャー型の接触状況（シミュレーション）

- ◆テーパ管の変形を、実際のパイプを使い台上で再現した。大径側の変形量が小径側よりも大きくなっている（図 2-2-5）動的な当たり不良の一因と考える。型形状にも一考を要する。



3次元測定器による変形量測定 テーパ管の変形傾向

図 2-2-5 テーパ管の変形傾向調査

2-2-2 テーパ管加工の加工点研究（2）～制御の見える化～
全電動型ベンダーの開発に当たり、ベンダー制御系に特別な改造を加え、サーボモータの制御

系からロール (V)、プレッシャー (P_0, P_1)、チャック (P_2) の、「力 (トルク)」「速度」「位置偏差」の情報を出力できる様にした (図2-2-6)。これによりいわば「制御の見える化」が実現し、研究が一気に加速した。

※「位置偏差」：プレッシャー等の部位の、設定された位置からの「ずれ量」を示す。



図2-2-6 ベンダー制御情報の見える化と観察会

図2-2-7に曲げ加工の状況と、「力」「速度」「位置偏差」の出力例を示す。縦軸に「力」「速度」「位置偏差」を示し、横軸は「時間」。「力」と「速度」の黒字 (+)、赤字 (-) は、サーボモータの回転方向による違いで、大きさを絶対値として見る。

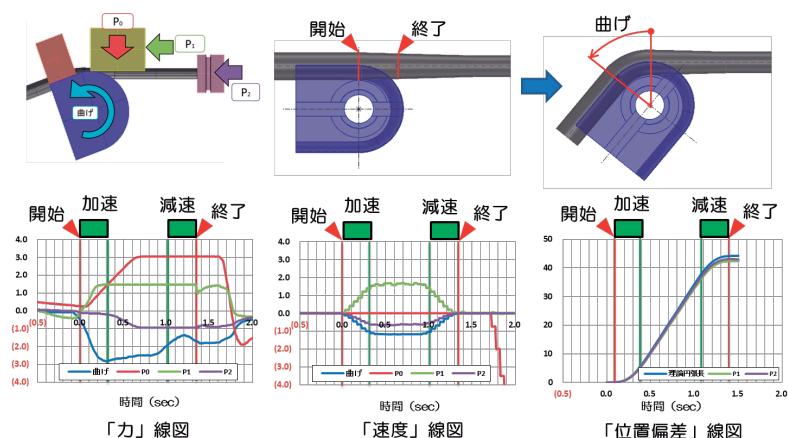


図2-2-7 「力」「速度」「位置偏差」情報の見える化

図2-2-8に、「曲げRの大小」による各部位毎の「力 (荷重)」変化の分析事例を示す。小 R (1.57D) と大 R (2.97D) の比較で、 P_0 、 P_1 、 P_2 、 V の値を示す。 P_0 、 P_2 、 V は差が顕著だったが、 P_1 にはほとんど差がなかった。

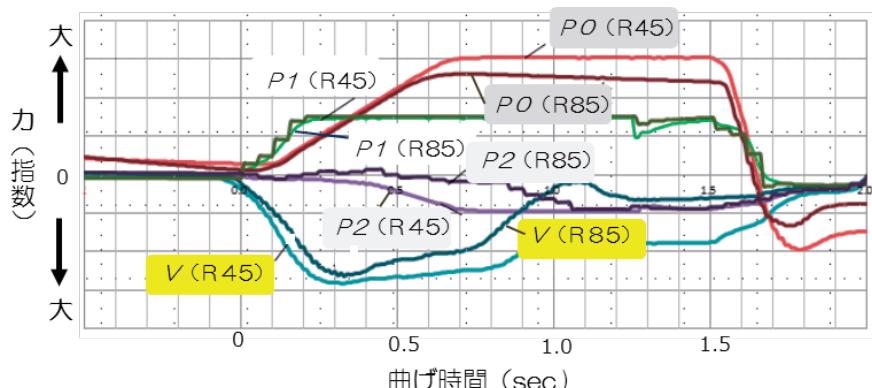


図2-2-8 各部位毎の力分析 (曲げR大小の影響度)

※ P_0 (R45) のピークが水平になっているのは設定上限荷重に達しているため。

2-2-3 加工精度測定の高度化（インテリジェントベンダーへの架け橋）

研究開始当初から、精度良く、早く測定でき、ベンダーにデータをフィードバック出来る（簡易的な）計測器の開発を模索した。図2-2-9に、形状測定器選定の経過を示す。②ハンディー計測器ベースは、測定範囲が限られ、座標変換ができないために断念した。最終的に非接触3次元形状測定器の採用により、思い描いた形を実現できた。

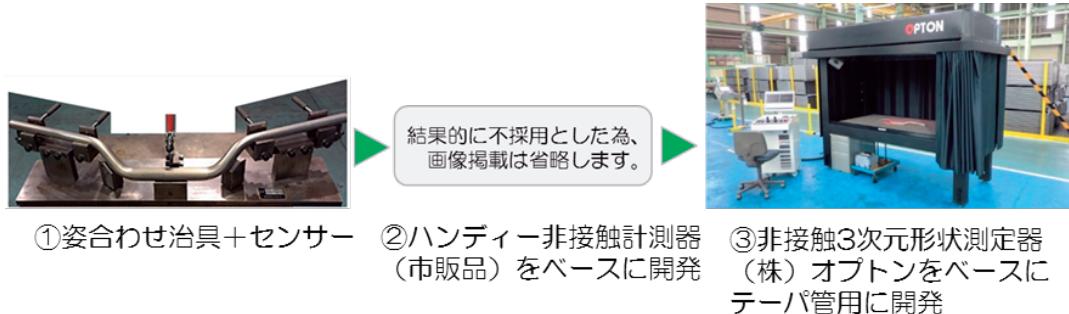


図2-2-9 形状測定器選定の経過

2-2-4 インテリジェントベンダーの開発

強いが、硬くて割れ易い材料を用いて、かつ、形状がずれ易いテープ管の曲げ加工を行う本プロジェクトの中心的な開発である。初年度から繰り返した試行錯誤を図2-2-10にまとめた。

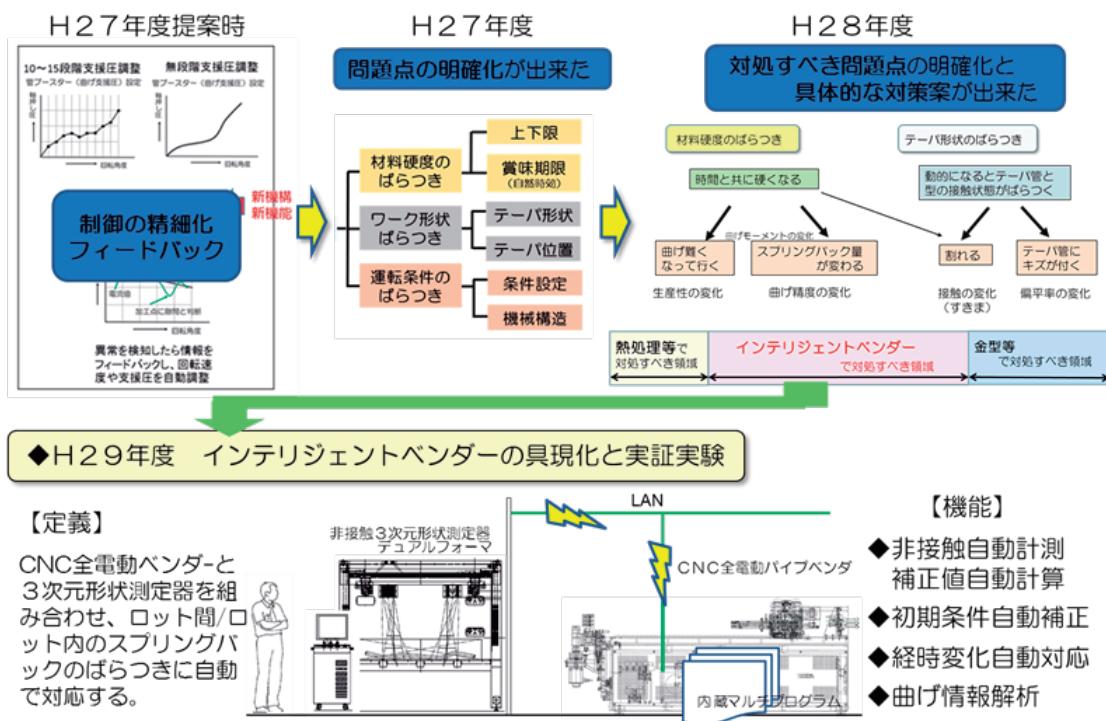


図2-2-10 インテリジェントベンダーの開発経過

当初のインテリジェントベンダー構想では、曲げ加工中のフィードバック制御を狙ったが、実質的な曲げ加工時間が1.5秒程度の短時間であり、この中のフィードバックは非現実的と判断した。種々の割れの原因と対策を明確化できることにより、非接触3次元形状測定器とベンダーをLAN接続させ、IoTと曲げ加工のインテリジェント化を実現した。

2-3 アルミ難加工材・テーパ管の曲げ解析技術の確立

2-3-1 基礎データの収集と解析

【A】テーパ管の曲げ解析技術の確立

ベンダー加工機の高度化を図るには、テーパ管をベンダーで曲げる際に作用させる各部位の圧力を適切に制御する必要がある。その圧力の大きさや時間変化の最適値を、解析によりあらかじめ予測出来れば、開発の為のコスト削減に大いに役に立つ。そこで塑性加工用解析ソフトウェア simufact formura を用いて、テーパ管のベンダー曲げ過程を解析した。図 2-3-1 に解析ソフトで設定したテーパ管ベンダー曲げ解析モデルを示す。工具と素材（テーパ管）からなる。素材はアルミニウム合金を仮定し、弾塑性体材料モデルと仮定した。その他の工具は変形しない剛体を仮定した。支援圧 P_0 、 P_1 および P_2 については、値の時刻歴を設定可能であるが、実験における値が加工中一定に作用するものとして与えた。解析の都合上、圧力ではなく工具に作用する荷重として与えている。

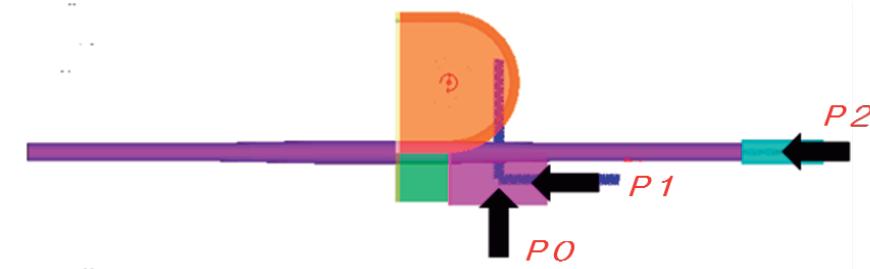


図 2-3-1 テーパ管ベンダー曲げ解析モデル

図 2-3-2 は約 30 度曲げた時の解析結果を示す。 $P_0 \sim P_1$ の圧力が適切に作用し、テーパ管をロールに押し付け、曲げが成功している状況を解析している。

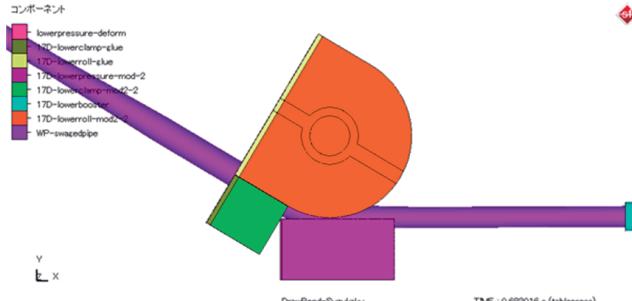


図 2-3-2 テーパ管ベンダー曲げ解析結果（約 30 度曲げ）

ベンダー曲げでは、素材がロールにしっかりと接触していることが重要である。そこで、解析結果から、素材と工具の接触状態を評価した。図 2-3-3 は、それぞれ加工開始時と終了時の素材と工具との接触状態を、見たものである。赤色の部分が接触している部位を示す。加工開始時には、素材はロール、クランプおよびプレッシャーとしっかりと接触しているが、加工終了時には、接触は、素材の側面だけになっている。解析には鈴覚(株)で一般的に使われている荷重を代用したが、 P_1 にくらべて P_2 が少ない、あるいは P_0 が大きすぎ、素材を前に押しつけすぎている可能性が考えられる。

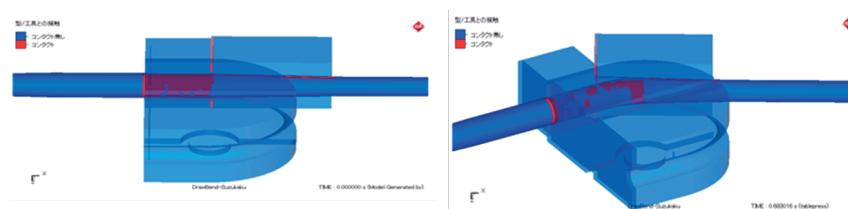


図 2-3-3 ベンダー加工中の接触状態（ロール側から観察）

※図 2-2-4 にプレッシャー側から観察した解析結果を掲載。

図 2-3-4 (a) (b) は、加工終了時の曲げ応力分布を示す。軸方向荷重がない場合、(a)の引張り側と(b)の圧縮側の応力の絶対値はほぼ等しくなる。本解析条件では、圧縮側の絶対値が、引張り側より大きく、素材は圧縮されながら曲げられているものと考えられる。

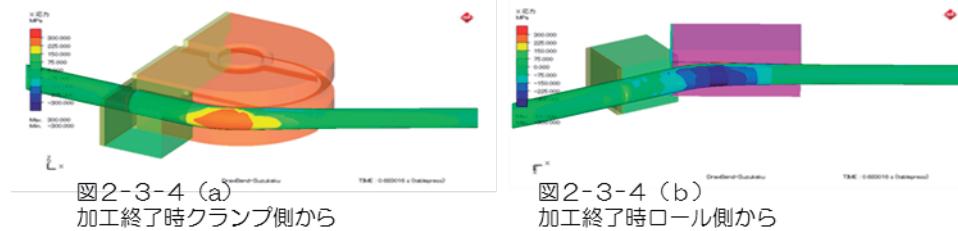
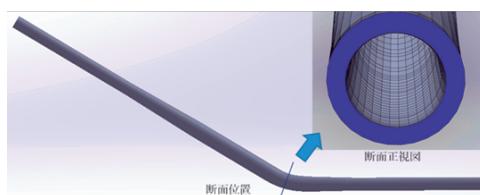


図2-3-4 加工終了時の曲げ応力分布

図 2-3-5 は、曲げ部の断面形状を示す。横方向につぶれた橢円形となっており、板厚も圧縮側が厚い。この寸法変化ができるだけ小さくする方案の確立が今後の課題である。



位置	寸法(mm)
短径(縦)	26.1
長径(横)	28.0
上部(ローラ側)板厚	4.08
下部(クランプ側)板厚	3.52
厚	3.75
横側板厚	

図2-3-5 曲げ部断面形状

【B】基礎データの収集と解析

アルミニウムの成形性を評価するため、テーパ管の曲げ加工時の強度・延性と同程度の特性を持つ A2000 系アルミニウム合金の板材を用い、Nakajima 法により成形限界線を求めた。

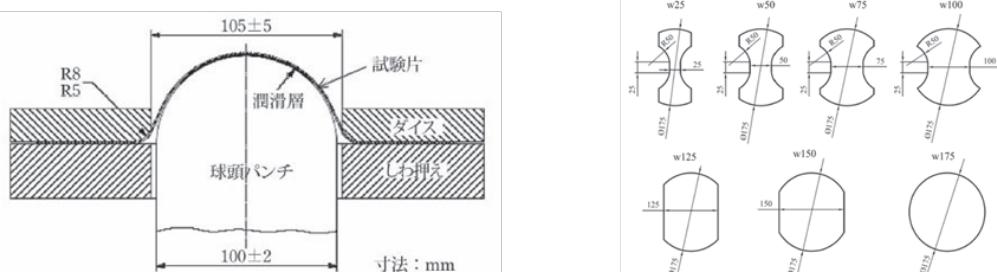


図2-3-6 Nakajima 法の概要と成形限界線取得用試験片

ひずみは、デジタル画像相関法に基づく 3 次元ひずみ測定器(GOM 社製 ARAMIS)により測定した。試験装置はエリクセン社製 薄板成形試験機(モデル 142-20Basic)である。試験片材料は ISO12000 に準拠し、図 2-3-6 の様に作成した。試験温度は 20°C、ポンチ速度 1mm/s、しわ抑え力 20kN、試験片-ポンチ間に牛脂-テフロンシート 0.03mm-牛脂の順番で潤滑剤を用いた。図 2-3-7 は、取得した成形限界線図を示す。

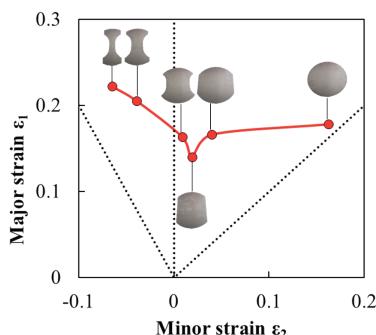


図2-3-7 成形限界線図

本開発では、室温で成形されるが、加工発熱や環境の変化により温度が室温以上になることも考えられる。その状況で、アルミ・テーパ管の加工性を評価する必要があり、温間域でのアルミ合金の加工性を評価するため、温間深絞り試験装置を用いて A2017 アルミ合金の温間深絞り性を評価した。実験方法としては、直径 33mm のパンチで直径 56.1、59.4、62.7、66 および 69.3mm の素板を深絞り加工し、破断までの最大絞り比 LDR（深絞り加工できた円板の最大直径/パンチ直径）を求めた。図 2-3-8 は、深絞り後の素板を示す。室温（25°C）では 62.7mm の素板は深絞り出来なかった。一方、温間域（200°C）では、用意したすべての素板を深絞りすることができた。室温では、LDR が約 1.9 であったが、200°C の温間域では、限界絞り比は約 2.2 となり、成形性が大きく向上した。

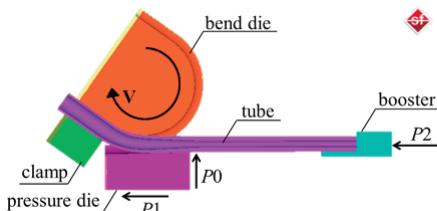


図 2-3-8 深絞り加工後の素板

2-3-2 A7000 系アルミ・テーパ管のシミュレーション解析

インテリジェントベンダーの制御のための指針を得る為、有限要素解析により、加工条件がテーパ管の曲げ部に与える影響を調査した。曲げ部の扁平化を最小にする 3 つの加工力の最適な組合せを探査するため、実験計画法に基づき 18 通りの加工条件の組合せの解析を実施した。図 2-3-9 は、解析モデルの概略を示す。クランプで管を締め、プレッシャーとブースターによる荷重 P_1 および P_2 で軸方向に荷重をかけ、またプレッシャーによる荷重 P_0 で管の外周を抑えながら曲げ型に沿わせて曲げ加工を行う。解析における曲げ角度は 45° とした。

実験計画法に基づき、 F 、 n 、曲げ速度 V ならびに加工力 P_0 、 P_1 ならびに P_2 を変化させ、曲げ時の扁平が最小となる組合せを探査した。基準となる加工条件のパラメータを表 2-3-1 に示す。また、実験計画法に用いたパラメータ群を表 2-3-2、L18 直交表を表 2-3-3 に示す。



Bending velocity V /rpm	7.5
Pressure P_0 /kN	22.07
Pressure P_1 /kN	8.75
Booster P_2 /kN	3.53

図 2-3-9 有限要素解析モデルの概略

表 2-3-1 基準となる加工条件

Bending velocity V /rpm	7.5, 15
Pressure P_0 /kN	14.71, 22.07, 29.42
Pressure P_1 /kN	4.38, 8.76, 13.13
Booster P_2 /kN	1.77, 3.53, 5.30
Work hardening exponent n	0.12, 0.24, 0.36
Plasticity coefficient F /MPa	467, 935, 1402

表 2-3-2 実験計画法に用いた加工条件

実験	因子					
	V[rpm]	P0[kN]	P1[kN]	P2[kN]	N[-]	F[Mpa]
1	7.5	14.7	4.38	1.77	0.12	467
2	7.5	22.1	8.76	3.53	0.24	935
3	7.5	29.4	13.14	5.30	0.36	1402
4	7.5	14.7	4.38	3.53	0.24	1402
5	7.5	22.1	8.76	5.30	0.36	467
6	7.5	29.4	13.14	1.77	0.12	935
7	7.5	14.7	8.76	1.77	0.36	935
8	7.5	22.1	13.14	3.53	0.12	1402
9	7.5	29.4	4.38	5.30	0.24	467
10	15	14.7	13.14	5.30	0.24	935
11	15	22.1	4.38	1.77	0.36	1402
12	15	29.4	8.76	3.53	0.12	467
13	15	14.7	8.76	5.30	0.12	1402
14	15	22.1	13.14	1.77	0.24	467
15	15	29.4	4.38	3.53	0.36	935
16	15	14.7	13.14	3.53	0.36	467
17	15	22.1	4.38	5.30	0.12	935
18	15	29.4	8.76	1.77	0.24	1402

表2-3-3 L 1 8直交表

表 2-3-4 は、18 通りの解析結果を示す。曲げ終わりであるプレッシャー側を 0° とし、角度 13° の位置の断面の偏平を測定した。偏平の程度について、断面を橢円とみなしした際の(長軸 - 短軸) (mm)で評価した。図 2-3-1 O は水準効果の推定値を示す。

実験	短軸(mm)	長軸(mm)	偏平度(mm)	SN比
1	25.72	26.71	0.99	0.09
2	25.84	26.7	0.86	1.31
3	25.91	26.69	0.78	2.16
4	25.82	26.74	0.92	0.72
5	26.01	26.64	0.63	4.01
6	25.77	26.71	0.94	0.54
7	25.98	26.7	0.72	2.85
8	25.84	26.75	0.91	0.82
9	25.83	26.61	0.78	2.16
10	26.12	26.71	0.59	4.58
11	25.75	26.72	0.97	0.26
12	25.67	26.65	0.98	0.18
13	25.88	26.76	0.88	1.11
14	25.95	26.64	0.69	3.22
15	25.72	26.62	0.90	0.92
16	26.29	26.7	0.41	7.74
17	25.73	26.72	0.99	0.09
18	25.72	26.72	1.00	0.00

表2-3-4 L 1 8直交表による解析結果

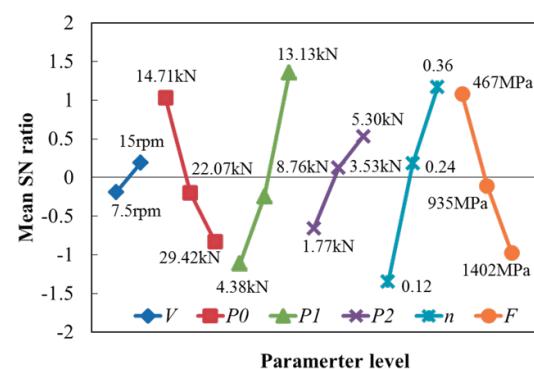


図2-3-1 O 水準効果の推定値

表 2-3-5 は、偏平の程度に対する各パラメータの寄与率を示している。 P_0 および P_1 の寄与率は、 P_2 よりも大きくなっている。これは、加工部に近い方がより管の曲げ部に影響を与え易いためと考えられる。また、材料特性の n の値も、扁平に対する影響度が高い。これは、 n の値が小さいと、局所変形が生じやすくなり、より扁平化し易くなることに起因する。容体化処理後、加工するまでの時間により、 n が減少することが分かっているので、 n の値の変化にも注意を払う必要があることが示唆される。また、 V の寄与率は非常に小さくなっている。材料モデルからは、速度の材料特性に及ぼす影響はほとんどない。したがって、実加工における V の影響としては、荷重の速度に対する追随性が考えられるが、解析では、その影響は考慮していないため、 V の影響は現れなかったと考えられる。

図 2-3-11 は曲げ加工部における偏平の程度の分布を示す。横軸は、曲げ部の位置を示して

おり、 0° が曲げ終わり部分であり、 45° が曲げ初めのクランプ部分である。角度が小さい部分ではプレッシャーの拘束がある為、偏平が抑えられているが、角度が大きくなると拘束されない為に偏平が大きくなる。 35° 以降ではクランプで固定しているため、偏平が小さくなっている。更に、テーパ管はクランプ側に向かって管径は大きく、肉厚は薄くなっている為、クランプ側がより偏平しやすく、グラフの様な分布になると考えられる。偏平に対し、寄与率の大きい P_1 を大きくしていくと曲げ部の全体的に偏平が抑えられている。

Factor	Contribution ratio / %	Factor	Contribution ratio / %
V	0.01	P_2	4.4
P_0	13.4	N	25.6
P_1	24.8	F	16.2

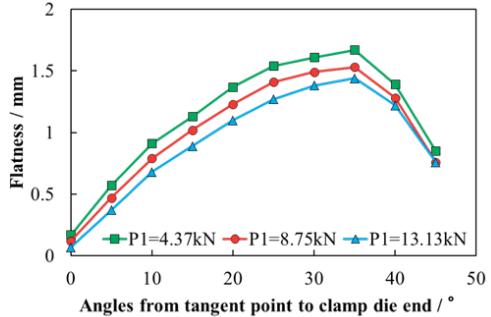


表2-3-5 偏平に対する寄与率

図2-3-11 曲げ加工部の偏平分布

図 2-3-12 は、解析において割れが発生する可能性がある部分を示している。また、図 2-3-13 は、図 2-3-12 において at risk となっている部位の最大及び最小主ひずみを、成形限界線図上にプロットした結果を示す。本加工では、曲げが主な変形であるため、ひずみ状態は単軸引張状態に近いことがわかる。その場合、最大および最小主ひずみの絶対値の比は 1 : 0.5 となる。また、臨界部の最大および最小ひずみの大きさは、成形限界線の下にあり、割れは発生せずに成形出来ることを予測している。

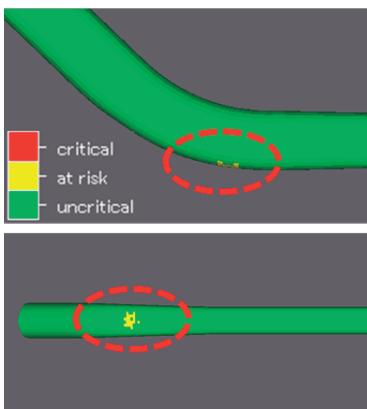


図2-3-12 曲げ部外側の割れ発生予測

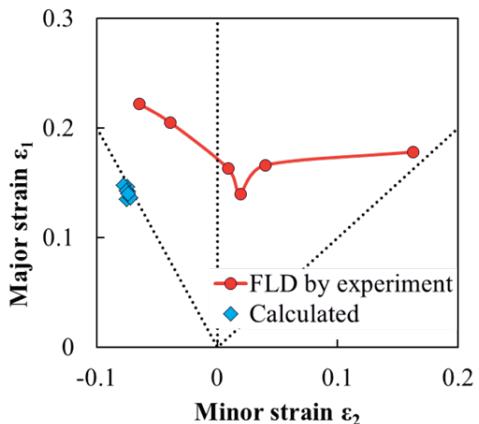


図2-3-13 成形限界線図及び
解析に於ける臨界ひずみ状態

図 2-3-14～2-3-15 は、それぞれ n より F の変化の、スプリングバックに及ぼす影響を示す。スプリングバック量はおおよそ 3.5° である。 P_0 , P_1 および P_2 を変化させた場合のスプリングバックへの影響は小さい。 F については値を大きくするとスプリングバックが大きくなり、 n については値を大きくするとスプリングバックが抑えられる。一般にスプリングバックは、曲げ加工時の曲げモーメントが大きくなると、大きくなる。曲げモーメントに最も影響があるのは、 F より n すなわち材料特性である。一般に、容体化処理からの経過時間が長くなるにつれて、 F の増加が見られることが分かっている。すなわち、容体化処理直後に曲げ加工を実施することは、スプリングバックの抑制の効果が大きい。したがって、本開発で整備された容体化処理炉、インテリジェントベンダーの一貫生産ラインは、寸法精度の高いテーパ管曲げ加工に対して有効な手法であることが解析から示された。

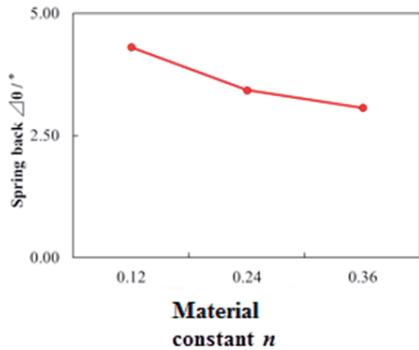


図2-3-14 スプリングバック量に及ぼす材料特性 n の影響

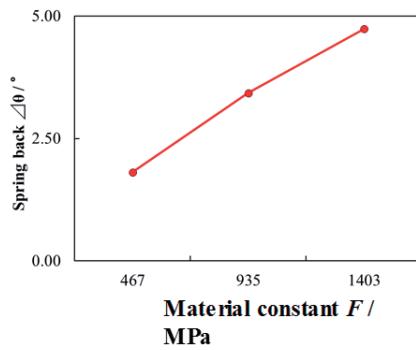


図2-3-15 スプリングバック量に及ぼす材料特性 F の影響

実際のテーパ管ハンドルの曲げ部の寸法を3次元形状測定器（GOM社製 ATOS）により測定した。測定した形状を図2-3-16に示す。曲げ内側部分に沿わせた円を基準に約5.1°毎に円管に対して垂直に断面をとり、長軸と短軸の長さを測定した。図2-3-17は、実験結果と解析結果の偏平の程度を比較した図を示す。実験値に比べ解析値の方が偏平していることが分かる。最大で0.5mm程度差があるが、凡そその傾向は一致している。扁平の程度の解析値が、実際の値より大きいのは、実際に作用している荷重、材料モデルおよび摩擦係数の不一致などが考えられる。今後インテリジェントベンダーに解析結果を反映する際には、解析と実際の値の差を考慮した補正を行うことにより、より高精度な曲げ角の制御が可能となる。

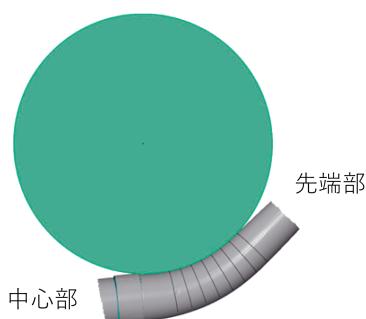


図2-3-16 取得した3次元形状と取得断面の模式図

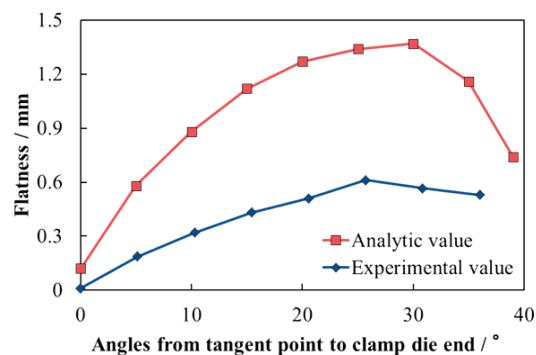


図2-3-17 偏平の程度に対する実験と解析結果

第3章 全体総括

初年度の基礎的事象の深掘りが、2年度以降の成果につながった。大学やアドバイザーとの緊密な連携が課題間の横通しを助け、シナジー効果を出せた。また、開発対象範囲が広いが故に、トップ以下の全社的な支援・協力を得ることとなり、研究活動を促進できた。

初年度、急速加熱熱処理炉のための要素技術を開発し、高性能・省スペース・省エネ型の連続炉開発に先鞭をつけることができた。2年度、曲げ解析技術（シミュレーション）研究を大きく進展させた。曲げ加工に関する領域で、シミュレーションと実験のコラボレーションの先導的な成果を残せた。2年度から3年度にかけて、ベンダー加工の研究が進んだ。全電動型ベンダーを改造し、制御の見える化により、テーパ管加工のみならず、ベンダー加工に広く使える新たなツールを完成させた。同時に、ベンダーと非接触3次元計測器をLANでつなげたIoTインターフェントベンダーを具現化した。

テーパ管の曲げ加工品の非接触3次元測定及び、補正値のフィードバックは前例がなく、今後、テーパ管の種類や曲げ形状の種類を増やして、一体成形加工技術に関する問題を発見・改善していく。事業化は、川下メーカーと連携しながら、車両との適合性を高め、早期の商品化を目指す。

この報告書には、補助業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通常の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。

リサイクル適性 A

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。