

平成30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

「ショットブラスト（ピーン成形）による金属大板の
自由形状をダイレス自動成形する技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成31年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人千葉県産業振興センター

目次

第1章 研究開発の概要	1
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）	3
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	4
第2章 本論	5
2-1 従来技術と本新技術の新規性	5
2-2 研究開発の具体的課題目標と結果	5
【1】 ロボットによるピーン成形自動化の課題への対応	5
【1-1】 自動ピーン成形のためのロボット制御システム開発	5
【1-2】 加工条件データベース作成	7
【1-3】 最適加工条件の決定	8
【1-4】 残留応力測定と変形状態の解析	9
【2】 広範囲の変形を高精度で測定する課題への対応	10
【2-1】 格子投影法による測定システムの開発	10
【2-2】 三次元計測ソフトウェアの開発	11
【2-3】 測定精度の向上	12
【3】 手動微修正システム開発の課題への対応	13
【3-1】 三次元計測・表示ソフトウェアの開発	13
【4】 大変形製品のピーン成形加工を行える技術開発課題への対応	14
【4-1】 大変形時重心移動補正ソフト開発	14
【4-2】 予備変形による大変形製品試作	15
最終章 全体総括	16

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

○ 研究開発の背景

金属建材製造の世界では、BIM(Building Information Modeling)の進展による建築物全体の3Dデータベース化の影響も受けて、急速に立体造形建築物の普及が進行している。また、普及の一般化と共に価格低下圧力が急激に増している。

建築分野以外でも、新幹線の形状推移を見て分かる如く、高速化に伴う燃費悪化等の問題を解決するため、高速列車等で立体造形製品が普及しつつある。また、飛行機でも中距離旅客機等の大量普及に伴って翼等の立体造形製品の生産性向上が求められている。このように新しい立体造形技術を受け入れる市場環境は急速に拡大している。

この研究開発は中小企業庁の中小企業の特定期間のものづくり基盤技術の高度化指針において、以下の項目に対応する。

(六) 立体造形に係る技術に関する事項

1 立体造形に係る技術において達成すべき高度化目標

(3) 川下分野横断的な共通の事項

①川下製造業者の共通の課題及びニーズ

オ. 生産性、効率化の向上、低コスト化

従来技術は生産性の観点からは極めて不十分であり、製品価格は極めて高価なものとなっている。低コスト化が図れれば市場は飛躍的に拡大するものと思われる。

○ 従来技術の問題点・研究目的

対象とする従来技術としては二つの技術を考えている。

第一の従来技術は小形冷間鍛造機により作業者の経験と勘を頼りに成形する従来の方法である。徐々に目標形状に近づけていくため成形の自由度は高いが、極めて長時間を要して生産性が低く、高価とならざるを得ない。

第二の従来技術は従来のピーン成形技術である。主に航空機主翼の成形に用いられてきたが、一般的な形状に対する成形方法が確立されていない。決まった形状以外では作業者の経験と勘を頼りに成形を行わざるを得ず、試行錯誤に長時間を要するため生産性は極めて低い。

自由かつ低コスト技術に対する市場の要求は強いが、従来技術は何れも生産性が非常に低く、その製品は極めて高価である。加工技術が必要とされている市場を十分に拡大できていない。

上記に述べたような市場に必要とされる技術分野を、形状的、加工方法的に特徴付ければ以下の様になる。

1) 大板かつ薄～中厚板(2000mm×4000mmで厚さ6mm以下)のダイレス加工(金型を使わない加工)のみが対応

可能。必然的に少量多種生産となる。

- 2) 曲率半径は 5000mm 程度 (変形量で 1000mm あたり 100mm 程度) の比較的小さな 3 次元変形を対象とする。
曲率半径は板の複数点で異なってもかまわない。

当社では数年前から金属建材に広く応用すべく、様々な立体造形技術の開発動向を調査・模索してきた。ぎょう鉄は造船業で一般化しているが非鉄には適用困難、インクリメンタル成形は直感的だが中厚板以上加工困難、従来型ピーン成形は特定形状以外適用困難、というように何れも我々の目的には適さないと言う結論である。

ただ、ピーン成形技術については大板の成形に適しており、ロボット等を使用した自動化も可能であると考えられたが、ネックはその直感に反するような変形動作の奇妙さであり、このため、一般的な形状を制御・加工する方法論は確立されていないことであった。

当社では、協力者である国立大学法人福井大学 大津教授がレーザーフォーミング向けに開発された「三角形パッチを利用した成形技術」をピーン成形に適用することにより、大板の自由形状加工をほぼ自動的に行う技術を開発可能であると考えて、検証を行っている。

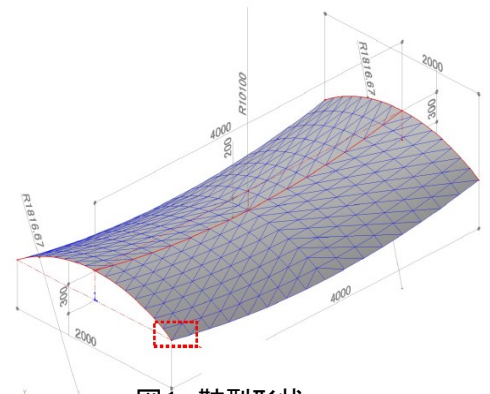
○ 研究目標

生産性向上

目標物生産に使用した作業員作業時間の90%以上削減を目標とする。

○ テーマ全体における加工目標形状

成形目標形状を 2000mm×4000mm の大板を鞍状に成形する事を目標とする。鞍型の変形程度は、端部の最大高さ部 300mm、鞍部の最低高さが 100mm とする。但し、検証時は1/2である 1000mm×2000mm 大の縮小形状を使用する。使用材質はアルミニウム、銅合金、ステンレスを使用する。



1-2 研究体制 （研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

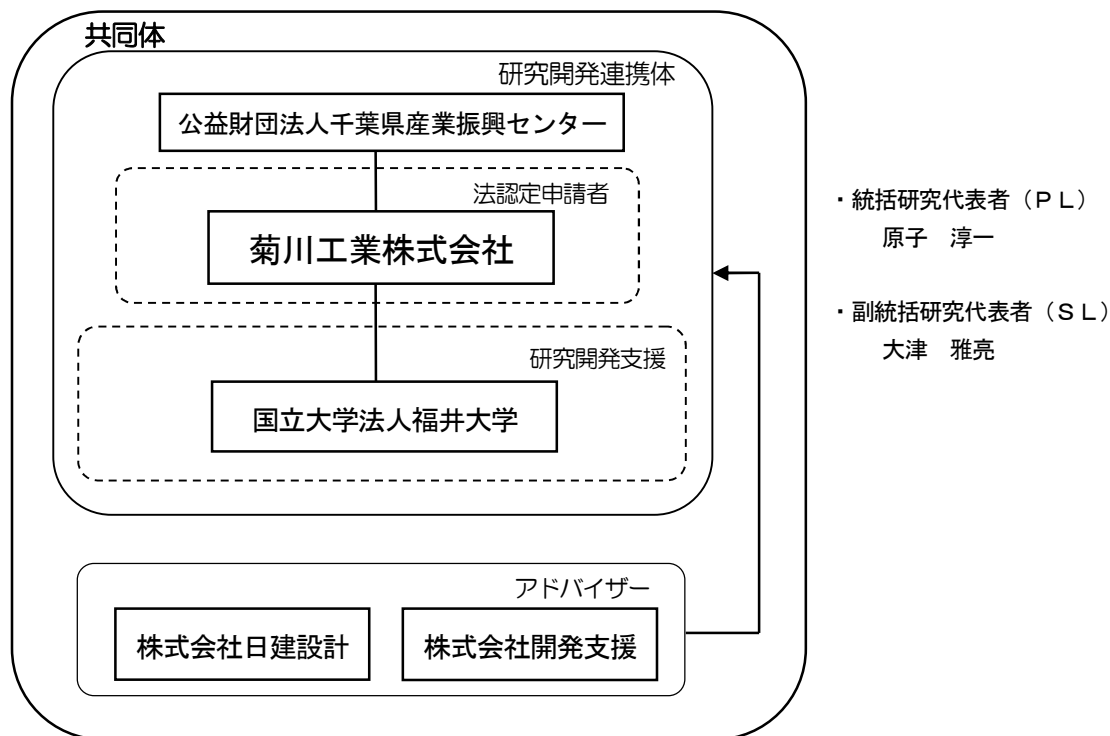


図2 研究体制

研究開発推進委員会委員等

No.	氏 名	所属・役職	備 考
1	原子 淳一	菊川工業(株) 製造部次長	PL 委員
2	大津 雅亮	国立大学法人福井大学 学術研究院工学系部門 機械工学講座 教授	SL 委員
3	藤垣 元治	国立大学法人福井大学 学術研究院工学系部門 知能システム工学講座 教授	委員
4	宇津野 嘉彦	菊川工業(株) 代表取締役社長	委員
5	伊藤 将司	菊川工業(株) 設計部	委員
6	伊藤 勝次	菊川工業(株) 製造部	委員
7	高松 良平	菊川工業(株) 製造部	委員
8	鈴木 貴裕	菊川工業(株) 製造部	委員
9	牧内 翔	菊川工業(株) 製造部	委員
10	川上 十伍	菊川工業(株) 常任顧問	委員
11	野中 智典	菊川工業(株) 総務部次長	委員
12	山梨 知彦	(株)日建設計 常務執行役員	アドバイザー
13	浦田 正男	(株)開発支援 代表取締役	アドバイザー

※PL:プロジェクトリーダー、SL:サブリーダー

表1 研究開発推進委員

1－3 成果概要

目標形状である鞍型形状の実現として当初、角度を付けて折り曲げる実験を実施していたが鞍型形状の成形には、伸ばす加工が必要と解り鞍型成形のショット条件に伸ばす手順を加える事で鞍型形状の実現ができた。また同じ加工条件（制御プログラム）でも製品の置き方、固定方法により変化が異なるため板材の固定方法としてバネ式や下地フレームを固定具とした加工を考案し、実験による検証を実施し鞍型成形への固定方法としての確認ができ、目標形状である鞍型形状の形状目標値として背中部 50mm と両端部 68mm に対し、ショット後の数値として背中部 27mm 程度、両端部 60mm 程度の到達であったが専用の下地フレームに固定すると目標数値まで馴染む事が出来た。鞍型成形時間の目標結果として従来加工時間 720 分（3 人×240 分）に対し、新方式では加工時間 60 分程度（1.5 人×40 分）となり、生産性の目標 1000%に対し、生産性 1200%を達成した。

継続研究開発として様々な形状成形の検証を行い実加工データベースの蓄積、その評価を行い成形技術のコントロール精度及び計測精度を高め、目標の造形時間に対する最適な加工条件を決定していく。加工時間の最適化及び加工製品の品質（形状精度）を向上させる際、分割されたサイズ（例えば、1m×1m）でピーン成形する事で加工時間及び加工精度が最適とされる場合が想定できるため、加工能力の評価に対応できる材質、板厚、サイズ、最大変形量等を明確にしていく。

今後は、特に造形時間に制限的な目標を設定し、市場の要求に合わせた改善、開発が必要である。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

菊川工業株式会社 製造部 原子 淳一

〒270-1406 千葉県白井市中98-15

電話：047-492-0144 FAX：047-498-4088

E-mail：j.harako@kikukawa.com

第2章 本論

2-1 従来技術と本新技術の新規性

従来、小型冷間鍛造機による成形であったが、新技術はロボットを流用した自動制御ショット装置となっている。また、作業時間を従来技術に対して10分の1以上に短縮する目標となっている。その比較を下図3に示す。

従来技術

小型冷間鍛造機による成形

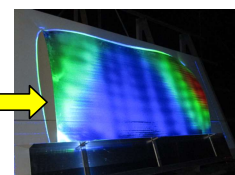
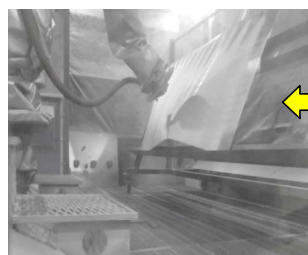


金属製の専用ゲージ

形状毎に用意した専用ゲージを目安に目標形状へ徐々に近づける成形

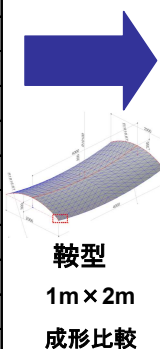
新技術

ロボット自動ショット装置による成形



三次元計測

従来技術		新技術	
成形技術	小型冷間鍛造機による成形	成形技術	新技術によるピーン成形
機械装置	小型冷間鍛造機	機械装置	ロボット自動ショットプラスト装置
金型	形状に応じた専用金型	金型	不要 (ダイレス)
データベース	図面・紙を基にベテラン技能者の経験、勘	データベース	三次元データの活用 技能不要
データベース2	図面・紙による手順の記録	データベース2	データベース(基本データ)・(実加工データ)
成形再現率	70%	成形再現率	100%
製品サイズ	700×2,000 (mm)	製品サイズ	2,000×4,000 (mm)
測定方法	数種類のゲージ(木型)による都度測定	測定方法	三次元測定
人員、日数	2人 × 4日間	人員、日数	1人 × 1日間
作業員時間(分)	3,600分	作業員時間(分)	360分以内
生産性	人員、時間が掛かり生産性が低い	生産性	1000%以上
安全性	安全確保に細心の注意	安全性	安全性が高い
作業員負担	作業姿勢、製品重量等により負担が重い	作業員負担	作業員負担ほぼ無し



鞍型
1m×2m
成形比較

図3 従来技術と新技術の比較表

2-2 研究開発の具体的課題目標と結果

【1】 ロボットによるピーン成形自動化の課題への対応

【1-1】 自動ピーン成形のためのロボット制御システム開発

(課題目標)

プラスト装置を使用して福井大学で開発された三次元CADのSTLデータから三角形パッチ法でプラストを行うロボットの制御プログラムを実際にSTLデータ入力してロボットが動作することを確認する。確認後、最終目標形状である鞍型形状の縮小モデルを実際にロボットで加工し、加工形状によって発生する問題点を抽出し、ロボット制御プログラムの調整及び加工環境の調整、整備を進めていく。

(結果)

設置完了したブラスト装置を使用して開発された三次元CADのSTL データからブラストを行うロボットの制御プログラムを実際に STL データ入力してロボットが動作することを確認した。また、計測、成形条件、ブラスト装置の統合システムの確認として1回目の測定結果を計測側からロボット側で受取り、目標とのズレ量から次のショット条件算出とショットを行い、その測定結果が目標数値へ近づいた事を確認できた。これにより計測、成形条件、ブラスト装置の統合が確認された。



図4 ショットブラスト装置設置



図5 装置内のロボットアーム装置設置

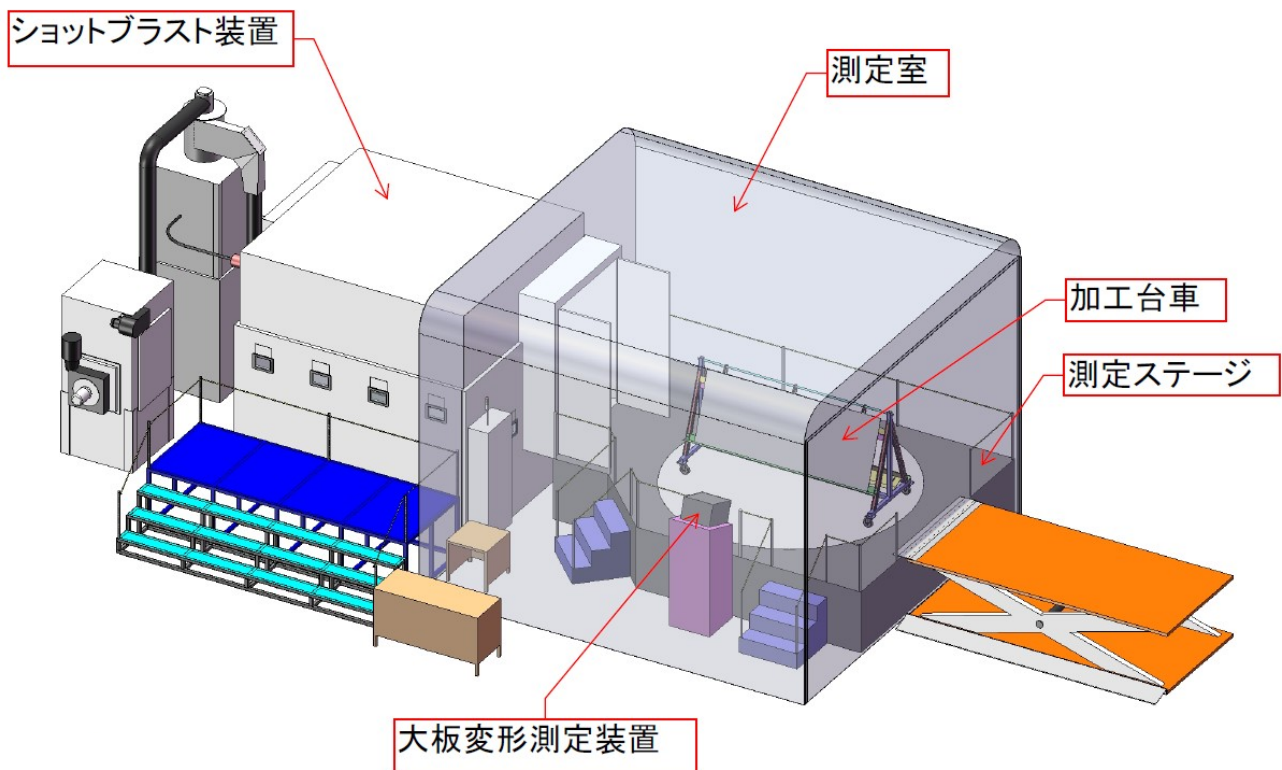


図6 ショットブラスト・大板変形測定システム構成図



図7 遮光テント内の測定環境（レール搬送方式）

< 計測、成形条件、ブラスト装置の統合 >

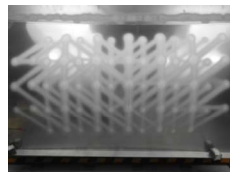
成形条件

ロボットの制御プログラム



成形条件算出

ブラスト装置



計測

目標とのズレ量



目標形状に近づくまで
逐次的に繰り返す



ショット後の測定

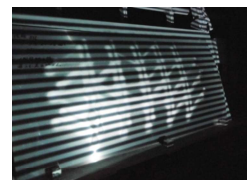
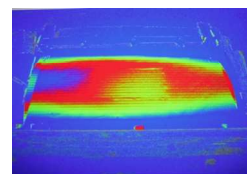


図8 ショットブラスト装置と三次元計測の流れ

【1-2】 加工条件データベース作成

（課題目標）

菊川工業でロボットを含む完成された装置を使用して最適加工条件の実験的決定を行い、完成された装置用のデータベースの作成を行う。また、加工する材質、板厚、形状に対して必要な変形量（角度）をデータベースより選定し、逐次的な成形を行う。この際の実加工データを蓄積し、目標変形に対するシミュレーション条件技術を確認していく。

(結果)

加工条件データベースとして設備装置側の圧力、噴射量を固定し、ロボット制御側を変数とし、各材質、板厚毎に1回のショットで変形する量(角度)を採取する事でデータベースとする。

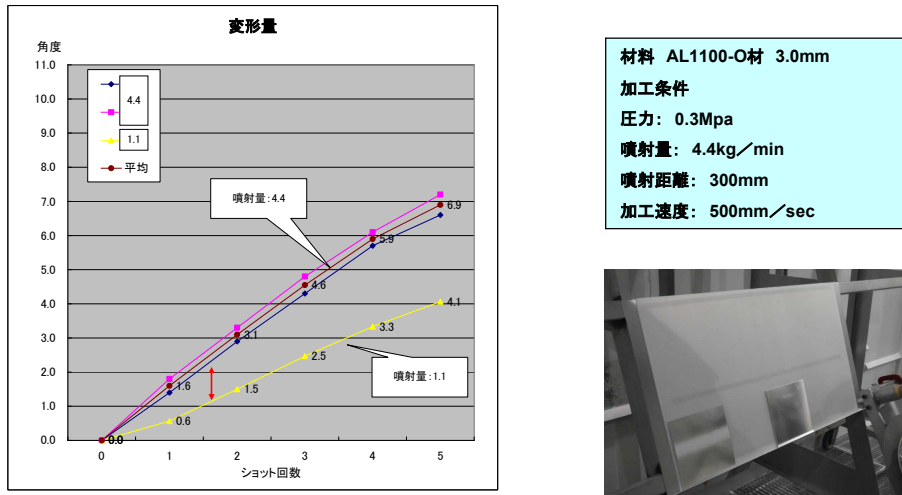


図9 ショット回数による変形量(角度)

- ・ プラスト装置側は、ショット材の供給が最も安定する数値で固定。
固定＝圧力：0.3MPa 噴射量：4.4kg/min
- ・ ロボットの速度 (mm/sec) を 100mm/sec 毎に採取し、最速を 1400mm/sec まで採取した。



図10 ショット材

【1-3】最適加工条件の決定

(課題目標)

最終目標形状である鞍型形状の造形実現を縮小モデル使用にて行い、その結果に対して表面性状と造形時間短縮のための研究を行う。

(結果)

最適加工条件の決定としては、本手法で目標形状である鞍型形状の造形実現を行い、次の段階で表面性状と造形時間短縮のための研究を行う事で最適加工条件の決定とする。(データベースの利用技術を高める) また、検証内でロボットの成形に不必要な動作を確認し、その対策としてノズル先端にシャッターを取り付ける事で取り付け前に比べ約20%の時間が削減できた。また、板材の表面性状としてもショット痕が減少した事を確認できた。

表面性状

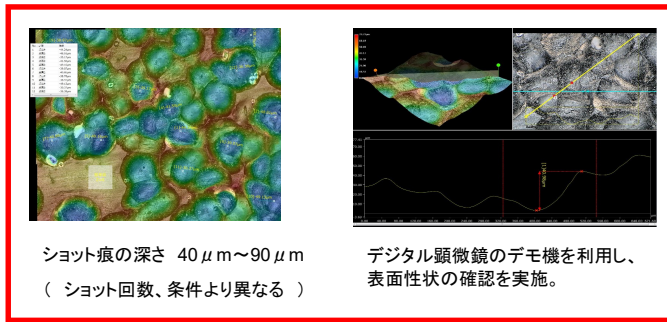
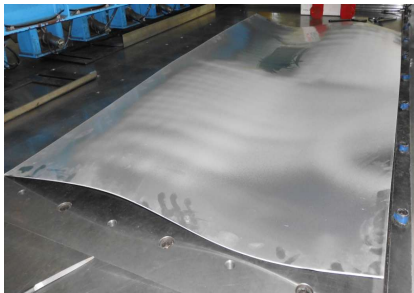


図11 表面性状

対策前



ロボットの不要な動作により
余計なショットの痕、変形がある。

対策後



余計なショットの痕、変形が無くなり
表面性状が良くなっている事を実証。

図12 対策によるショット比較

【1-4】 残留応力測定と変形状態の解析

(課題目標)

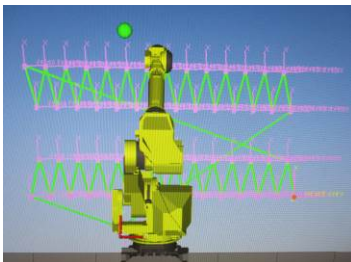
板材の圧延方向とショット投射経路の方向の関係によって同じ条件で加工しても変形量が異なることが判明した。このことから、ある条件で変形状態を解析し、実験により残留応力測定を行って解析精度を検証しても、事前に投射経路を決定するために必要なデータを得るには、膨大な時間が掛かってしまう。その為、今回の手法による実験で得られた基本となる投射条件と変形量の関係のデータベースを用いて、1回目の加工を行い、三次元測定によりデータベースからのずれ量を求めて2回目以降の加工はデータベース自体をその都度補正して使用する。このことは、初期に用いるデータベースに高い精度は必要なくデータベースの精度を上げるための残留応力測定と変形状態の解析はあまり重要ではないため、材質毎の限られた数パターンでの残留応力測定と変形状態の解析を行い、参考データとする。

(結果)

目標形状である鞍型形状の縮小サイズを成形し、鞍型成形に必要な手順を確認した。鞍型成形に伸ばす加工が必要と解り、当初の角度を付けて曲げる加工からの実験に対して板材を伸ばす事を追加して、必要なショット条件を考案し鞍型成形を確認することができた。

目標時間を設定した上での最終ショット後の鞍型形状は、目標とした数値に各所で未達成であったが取り付け用の専用フレームに馴染ませて取り付けする事で目標の数値を達成した。

鞍型成形に必要なショット



板材の端部を伸ばす

図13 シミュレーション画像

ショット後、鞍型形状

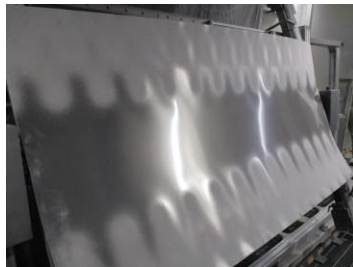
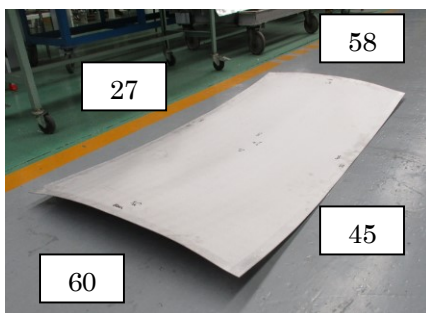
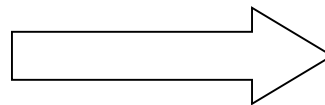


図14 実際のショット後、写真

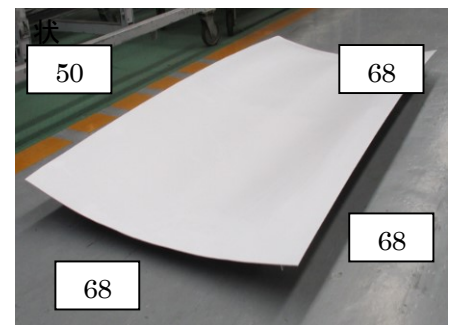
ショット後の鞍型形状



単位mm			
測定項目	目標	成形	差異
背中部(反り)	50	27	-23
端部1	68	60	-8
端部2	68	58	-10
中央	68	45	-23



下地フレーム取り付け後の鞍型形状



単位mm			
測定項目	目標	成形	差異
背中部(反り)	50	50	0
端部1	68	68	0
端部2	68	68	0
中央	68	68	0

図15 成形目標と計測差異

【2】 広範囲の変形を高精度で測定する課題への対応

【2-1】 格子投影法による測定システムの開発

(課題目標)

2000mm×4000mm 大板で測定可能な格子投影法による三次元計測装置の確認を行う。

内容として目標形状の測定を行い、測定した数値結果及び測定時間、測定精度の確認を行う。

(結果)

導入した格子投影法による三次元計測装置を使用して 2000mm×4000mm 大板で測定可能な事を確認した。 測定範囲： 2m×4m、測定高さ：400mm、測定精度：±10mm（測定高さ 300mm）
測定時間：300 秒以内達成



図16 格子投影

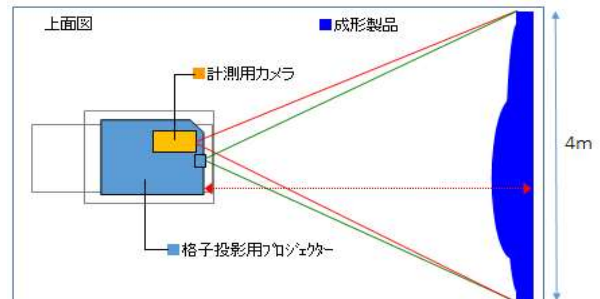


図17 システム概略図

【2-2】 三次元計測ソフトウェアの開発

(課題目標)

2000mm×4000mm 大板で測定可能な三次元計測ソフトウェアの開発を行う。内容として目標形状の数値に対し、測定した数値結果とを照合し、そのズレ量を算出し、ショットブラスト側での2回目以降のショット条件を補正する為の数値とする。

(結果)

三次元計測ソフトウェアの開発の確認としてネジレパネルの成形検証を実施した。

1 回目のショットを行った製品を測定し、その測定結果である目標とのズレ量から次のショット条件算出と 2 回目のショットを行い、その測定結果が目標数値へ近づいた事を確認できた。これにより計測、成形条件、ブラスト装置の統合が確認され、三次元計測ソフトウェアの確認がされた。

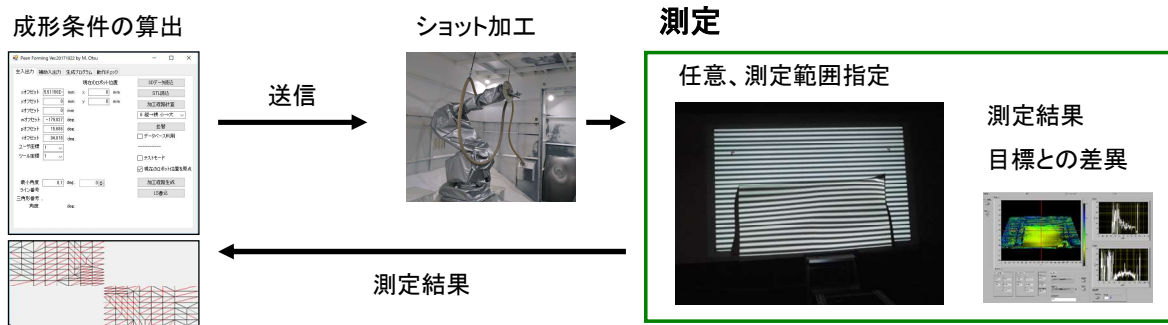


図18 三次元計測とショットブラスト装置の流れ

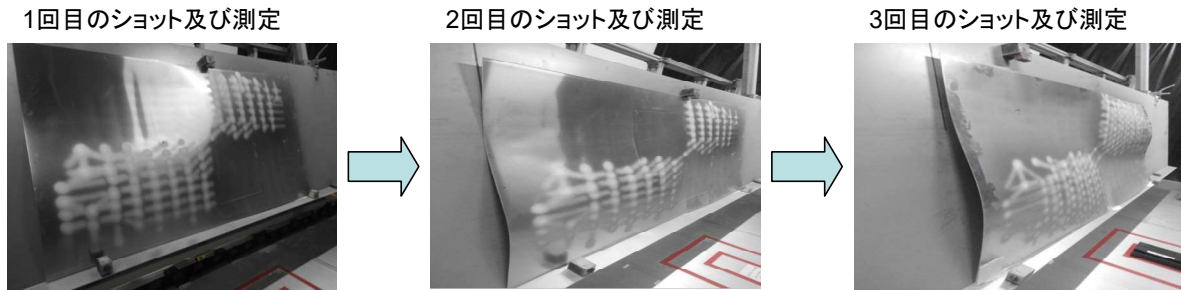


図19 ネジレパネル形状の成形検証

【2-3】 測定精度の向上

(課題目標)

測定精度を向上させるために測定室の遮光及び測定用台車（加工台車と併用式）、測定ステージ等の精度向上が必要となり、ソフトウェア開発と平行して測定精度の向上を行う。

(結果)

測定室を遮光テントに変更し、専用の測定台車及び測定ステージによりノイズの発生を減少させる事が出来、精度の向上が確認出来た。また、任意で製品形状に合わせた測定範囲の指定が出来る様に機能追加した事により、目標形状との差を精度良く表示できる事を確認した。

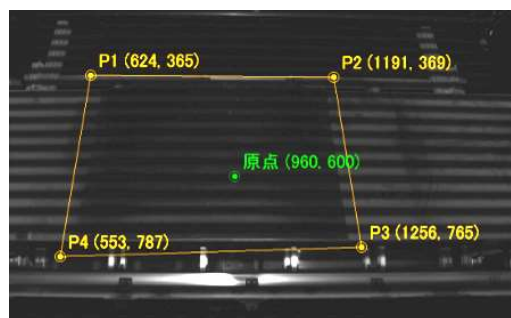


図20 任意での測定範囲の指定

【3】 手動微修正システム開発の課題への対応

【3-1】 三次元計測・表示ソフトウェアの開発

(課題目標)

作業員に成形形状との誤差存在位置を製品面への着色画像投影により示し、成形程度は投影画像の色の濃さで示す。菊川工業で実機用ソフトウェア開発を行う。目標数値とのズレ量に応じて着色を決め、投影する技術開発を行う。

(結果)

三次元計測装置とプロジェクターを使用して測定した製品高さに着色して製品面に投影を確認した。ネジレ形状の成形過程で目標に近づく変形を着色画像投影で確認した。着色の色により加工継続の判断を作業員が目視で判断できる事を確認した。目視確認を解り易くするために色の配分を選別し、また形状に応じて着色領域を変更できる様に改良を行い、製品面へ投影を実施し、確認を行った。

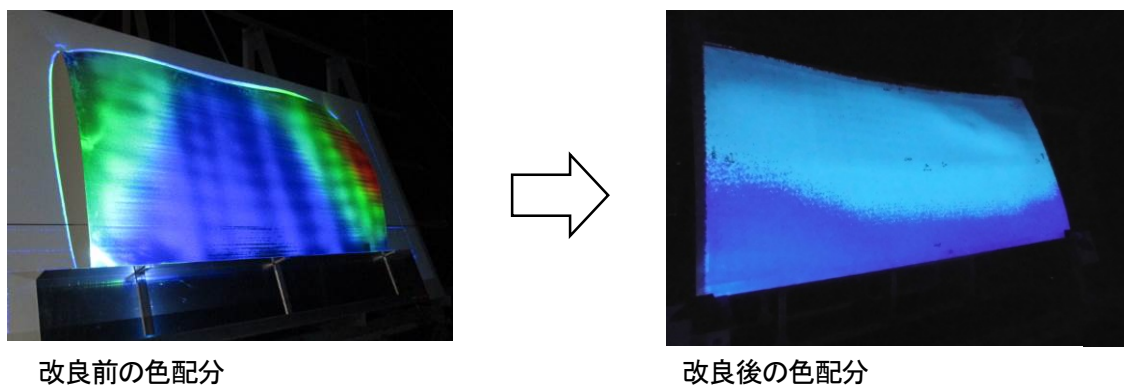


図21 目視し易い色へ調整

鞍型成形で測定・画像投影を繰り返し目標形状に近づいている事を確認

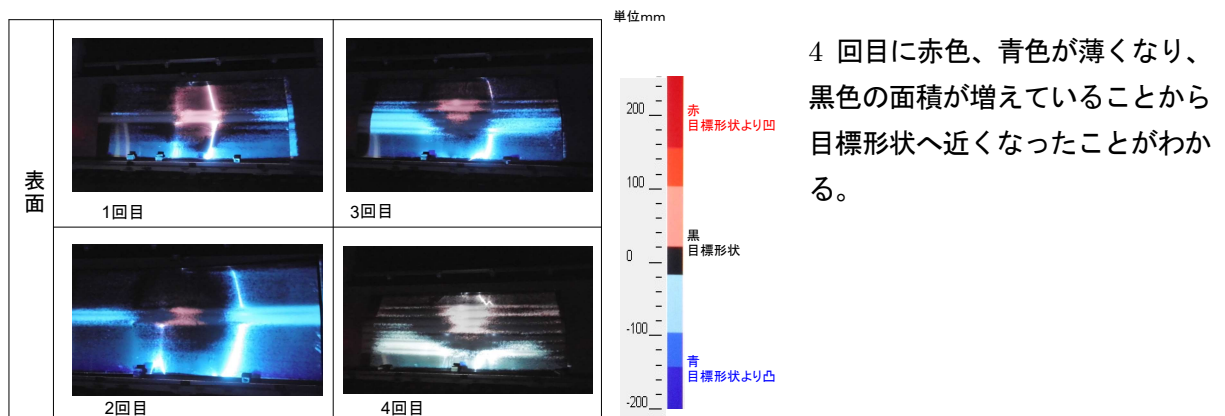


図22 目標とのズレ量を目視で確認

【4】 大変形製品のピーン成形加工を行える技術開発課題への対応

【4-1】 大変形時重心移動補正ソフト開発

(課題目標)

加工として起こる板材の変形による重心及び原点位置が変わる事への対策対応を実施する。対策として重心、原点位置のズレが最小限におさえられる加工用台車を製作する。また、重心・原点位置変更を補正するソフトウェアを開発する。

(結果)

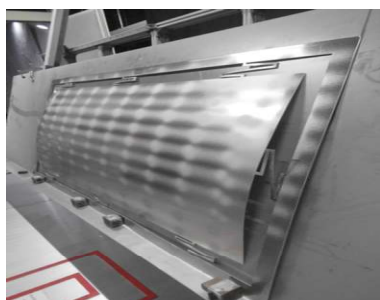
同じ加工条件（制御プログラム）でも製品の置き方、固定方法により形状の変化が異なる事が確認された。故に原点位置のズレが最小限におさえられる加工台車は、以下の影響を考慮したものを個別に、または組み合わせて用意する必要がある。

- ・ 板材の圧延方向の影響
- ・ 投射経路の方向の影響
- ・ 板材の形状による影響
- ・ 板材の固定方法の影響

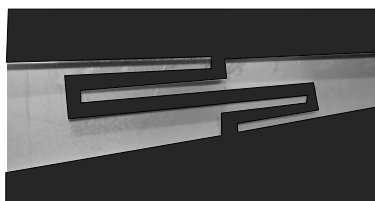
板材の固定方法を形状毎に決定し、様々な形状を成形する事で形状タイプ毎の条件技術を決定する必要がある。以下は今回の検証により効果を得たものである。

- ・ 板材の固定方法としてバネ式を考案し、検証による効果を確認し、
重心・原点位置変更を補正するソフトウェアの開発は不要となった。
- ・ 下地フレームを固定具として使用し、効果を確認した。

立て掛け方法+バネ式

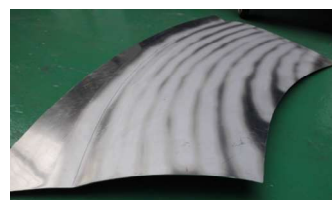


下地フレームを利用した固定方法



ジョイントの残し箇所、ピッチにより変形量を調整する。

バネ式が有効とする形状



重心及び原点位置は変わらず変形を妨げない

図23 固定方法の考案と検証

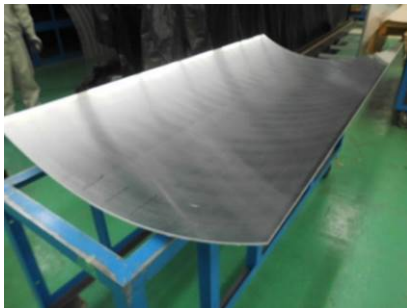
【4-2】 予備変形による大変形製品試作

（課題目標）

大変形製品を、ロールベンダーで予備変形を与え、必要な複雑部分のみピーン成形で仕上げる方法を実験的に探求する。

（結果）

鞍型成形として事前にロールベンダー等で予備変形を与えたものにピーン成形で必要部にショットを行う事で鞍型形状への変形は確認できた。但し、予備変形させたものにピーン成形を行うと変形量が減少するため、減少する数値を事前に予測する必要がある、現状段階では曲げすぎない様に注意を行い、今後の継続研究として目標形状に合わせた適正予備変形データの蓄積を行う。まずは、任意で必要箇所にショットができる制御プログラムの開発を実施した。



事前にロールベンダーで
予備変形を付けた部材

図24 予備変形

任意で必要箇所にショットする為の制御プログラム開発

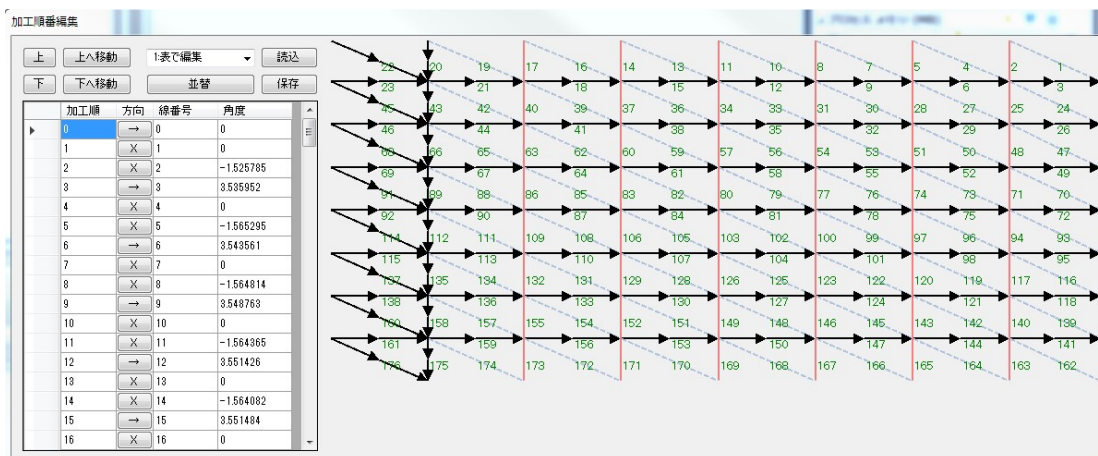


図25 鞍型成形用の制御プログラム

図25の矢印は、ショットする方向を表し、番号は、ショットする場所を表している。

最終章 全体総括

○ 研究開発成果

目標形状の三次元データからブラストを行う制御プログラムを実際にデータ入力して動作することを確認した。また、計測、成形条件、ブラスト装置の統合システムにより計測結果から目標とのズレ量を算出し、次のブラストを行う事で目標数値へ近づいた事を確認する事が出来た。今回開発した技術により鞍型形状の成形をする事が出来、専用フレームに固定する事で目標数値を到達出来た。生産性としては、従来技術の延べ加工時間に対し、新技術では自動化による人員削減等により生産性 1200%を達成した。

○ 継続研究課題

開発されたショットブラスト装置と三次元測定装置により様々な形状成形の検証を行い実加工データベースの蓄積、その評価を行い成形技術のコントロール精度及び計測精度を高め、目標の造形時間に対する最適な加工条件を決定していく。最大サイズを 2M×4Mで開発を進めているが加工時間の最適化及び加工製品の品質（形状精度）を向上させる際、分割されたサイズ（例えば、1M×1M）でピン成形する事で加工時間及び加工精度が最適とされる場合が想定できるため、加工能力の評価を対応できる材質、板厚、サイズ、最大変形量等を明確にしていく。特に造形時間に制限的な目標を設定し、市場の要求を満たせるものとする。

○ 事業化展開

本研究開発技術が完成すれば、製作コストの削減と製作期間の短縮により各市場への貢献ができる。現在も 3 次元曲面を含む現場引合いは増加しており、早急な研究成果による試作等の着手、提供等を期待されている。

- ・ 建材市場： 国内+海外の 3 次元形状を含む現場情報（引合い）
- ・ 現場数： 14 現場、 金額：23.5 億円
- ・ インテリア市場：主に国内
- ・ 現場数： 12 現場、 金額：4.1 億円