平成 24 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「可変曲げ R パイプ連続加工技術/多軸 NC 制御加工機の開発」

研究開発成果報告書

平成 25 年　3 月

委託者　関東経済産業局

委託先　武州工業株式会社

目　次

第１章　研究開発の概要＜平成２４年度取組み内容＞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３
①材料の力学特性評価とシミュレーションによる高精度曲げの検討・・・・・・・・３
②多軸 NC 制御加工機の汎用化（CNC 化）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４
③多軸 NC 制御加工機の高度化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４
④試作品の製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５
⑤プロジェクトの管理・運営・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５
１－１　研究開発の背景・研究目的及び目標・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６
1－1－1.研究開発の背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７
1－1－2.研究目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７
1－1－3.研究目標・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７
１－２　研究体制・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８
1－2－1.研究組織・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８
1－2－2.管理体制・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９
1－2－3.研究者氏名・協力者・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１
１－３　成果概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２
1－3－1. ①材料の力学特性評価とシミュレーションによる高精度曲げの検討・・１２
1－3－2.②多軸 NC 制御加工機の汎用化（CNC 化）・・・・・・・・・・・・・・・１２
1－3－3. ③多軸 NC 制御加工機の高度化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３
1－3－4.④試作品の製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３
１－４　当該研究開発の連絡窓口・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３
第２章　本論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４
２－１材料の力学特性評価とシミュレーションによる高精度曲げの検討・・・・・１４
２－２多軸 NC 制御加工機の汎用化（CNC 化）・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４
２－３多軸 NC 制御加工機の高度化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４
２－４試作品の製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１５
最終章　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１８

第１章　研究開発の概要

1）可変曲げRパイプ連続加工技術の確立

可変曲げRパイプ連続加工技術は「一個の小さい曲げ駒」を偏芯させながら連続移動をさせて大きな曲げ半径を自在に作り出す方法である。この方法を確立することで、『渦巻き型』の熱交換器用パイプを製作する際、従来工法である手動単発曲げ工法では必要であった金型製作/段取り替え・移動・セット等の工数を大幅に削減することができた。また、段取りレスで連続した加工が行える為加工精度/生産性の向上により更なるコスト低減が実現できる見込みとなった。

2）多軸NC制御加工機の開発

可変曲げＲ連続加工を行う為には多軸同時制御の仕組みが曲げ点に必須である。今回の事業では計11軸の制御の高度化・汎用化をCNC化することにより達成し、同時多軸制御による高度な動き/制御を実現することができた。また、可変曲げR連続加工を行う為に最適な機台機構も開発することができた。

3）成形シミュレーション

パイプ曲げ加工は事前に素材の伸び、スプリングバック等の変形量を予測する事が難しく、図面イメージの製品を製作する為には試作加工が必須であった。また、製品形状により加工上機台と干渉する場合もあり、事前に予期できることは非常に有益である。　本研究開発では製品形状を図面データとして入力するとパソコン上でシミュレーションを行えるシミュレーターを開発した。また、シミュレーターのアウトプット機能として多軸 NC 制御加工機に使用する加工プログラムデータ【G コード】を生成することも可能となった。可変曲げ R 連続曲げ加工に対応したシミュレーターを開発できたことにより多種多様な形状への対応が可能となった。

4）試作品の製作

本研究開発の目的は従来の NC ベンダー加工機では加工が困難であった「渦巻き型」形状を可変曲げ R パイプ連続加工技術を使用した多軸 NC 制御加工機にて製作することであり、3 年間の事業を通して可変曲げ R パイプ連続加工の優位性を確認、評価できる試作品を製作することができた。また、研究開発の目的にも記載をした熱交換器用のパイプ部品の小型・軽量化、低コスト化、多様化する開発ニーズ/スピードに対応する為の技術確立も行うことができた。

＜平成 24 年度の具体的な取組み内容＞

① 材料の力学特性評価とシミュレーションによる高精度曲げの検討

（実施：武州工業株式会社、公立大学法人首都大学東京）

材料の力学特性の評価試験によって得られたデータ（降伏応力、応力-ひずみ曲線やＦ値、n 値及びｒ値等）を用いて構造解析ソフトによる有限要素解析を行い、材料ごとに「スプリングバック量」、曲げ加工による材料の「伸び」を求め、得られた結果の数値データを入力し、補正を行う。

構造解析ソフト【ANSYS-Dyna】による動作解析を行うとともに、材料の力学的特性の検証を行い、曲げ精度保証された加工技術の確立を図る。高度化された熱交換器の部品として使用が予想される材種 2 種(銅･アルミ)に関して、下記検証の対象リスト(図 1)の材料において材料試験による力学特性評価を行う。ANSYS-Dyna による解析から、スプリングバック量及び曲げ加工による材料の『伸び』に関する数値を求め、曲げ特性の基礎データを得る。

また、ここで得られた材料特性検証結果を、シミュレーションソフトへ入力し、妥当性を確認する。

②多軸 NC 制御加工機の汎用化（CNC 化）

（実施：武州工業株式会社）

昨年度製作した多軸 NC 制御加工機は､可変曲げＲパイプ連続加工を行うため、7 軸の NC 制御を駆使しているが、同時（同期）動作のできる軸は 2 種類であるため、加工動作の短縮を行う場合の障害となっている。加工動作の短縮を目的として、6 軸が同時に制御できる制御装置・制御ソフトにバーションアップを行う。また、現在の制御装置・制御ソフトは機械動作を行うまでに計 3 回のプログラム言語の変換作業があり、デバック（加工品より得られた結果を加工プログラムへフィードバックする行為）が容易に行えず、汎用性の面では実用化の障壁となるため、G コードを採用する。

③多軸 NC 制御加工機の高度化

（実施：武州工業株式会社、公立大学法人首都大学東京）

昨年度製作した多軸 NC 制御加工機に 1 軸『パイプ受け（保持）軸』の追加を行うことにより、曲げ加工の際に曲げ点に最も近い位置でパイプを押さえることができ、変形防止を達成できる。これにより、曲げの高精度化及び高速化を実現する。

④試作品の製作

（実施：武州工業株式会社）

改造した多軸 NC 制御加工機を使用し、可変曲げ R パイプ連続加工技術の優位性を確認・評価できるサンプル製品を製作する。蛇行型パイプ（図 2）は現存する技術で汎用性を有するため、渦巻き型（図 3:右曲げ/左曲げ版）や蛇行型と渦巻き型が混在する形状（図 4）等をシミュレーターから出力された加工データを利用し、加工動作が行えるように改良・改善作業を行う。

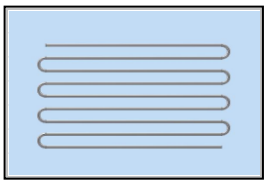


図 1：蛇行型パイプ例

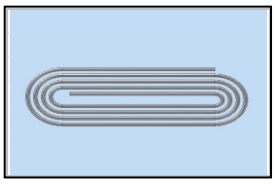


図 2：渦巻き型パイプ例

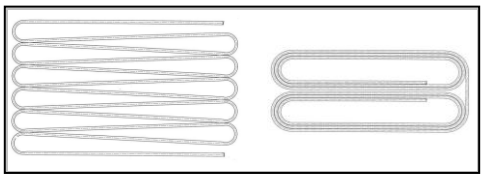


図 3：蛇行型/渦巻き型混在の一例

⑤プロジェクトの管理・運営（実施：武州工業株式会社）

- 事業管理機関：武州工業株式会社において、本プロジェクトの管理を行う。プロジェクトの研究経緯と成果について取りまとめ、成果報告書２部及び電子媒体（ＣＤ－ＲＯＭ）１式を作成する。
- 本研究の実用化に向けた到達の度合いを検証するとともに、事業化に向けての課題等について研究実施者と調整を行う。
- 再委託先事業者が作成する証憑書類について、指導・確認を行う。
- 研究開発推進委員会を委託契約期間内に６回程度開催する。

1－1．研究開発の背景

平成 22 年度戦略的基礎基盤技術高度化支援事業を申請/実施するにあたり、中小ものづくり高度化法及び中小ものづくり高度化指針に基づき下記事項を選択した。

【特定ものづくり基礎基盤高度化方針】

（十一）金属プレス加工に係る技術に関する事項

1　金属プレス加工に係る技術において達成すべき高度化目標

(6) その他

＜川下産業製造業者の抱える課題及びニーズ＞

ア．小型化・軽量化

近年、Co2 削減の一環として高効率給湯器（エコキュート、エコウィル、等）の普及が進んできているが給湯器システム内にある熱交換器部分の銅パイプの曲げ形状がネックとなり設備の小型化が実現できていない。その為、高効率給湯器システムを導入できる住宅は一戸建て等の置き場スペースに余裕のある住宅に限られ、マンション等の集合住宅向けにはまだまだ普及しづらい状況が課題として見える。熱交換率が同等と考えた場合、機能部の占有スペースを極小化したいというニーズがある。

ウ．低コスト化

現在、ヒートポンプ式給湯器（エコキュート）家庭用燃料電池（エネファームなどの導入には国から補助金制度の利用が出来るが、導入への課題として初期投資の高さが挙げられる。低コスト化実現には量産性を高め、システム内の部品単体のコストを下げる必要がある。

どちらのシステムにも複数に曲がった細いパイプ部品が使用されているが曲げ半径を混在させた製品を作る場合には、曲げ R 毎の金型（曲げ駒）を製作する必要がある。その為、川下産業の初期投資の負担が大きかった。また、生産現場においては金型（曲げ駒）の段取り替えが多く、精度/生産性ともに低いものづくりがコスト高の原因となっている。

エ．短納期化

高効率給湯器供給メーカーの今後の課題として供給する製品の多様化が挙げられる。住宅事情に合わせさまざまな形、大きさ、機能に合わせシステム内部の機能部用パイプの形状も変化するがその開発速度を緩める課題が以下である。

1)曲げ半径（曲げ R）毎の金型製作

2)生産現場において金型の段取り替え

3)現行工法で曲げ半径を混在した場合「単発曲げ工法」

となっている。

これらの廃止、または改善がニーズとして挙げられている。

＜上記を踏まえた高度化目標＞

カ．プレス機械及び金型技術の向上

熱交換パイプは一般的には図１に示す蛇行型形状の銅パイプを使用した熱交換器が用いられている。

蛇行型を採用した場合、パイプの最小曲げ半径の関係からパイプ間の隙間が比較的大きく、同一曲げ R での連続加工を行う事が一般的である。一定の熱交換率を確保する為には大型化せざるを得ない背景があった。
この問題を解決するには図２のような渦巻き型に熱交換器パイプを加工して配置をすれば小型化が実現出来る。

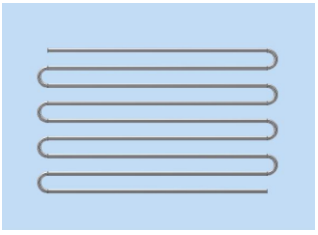


図１：蛇行型熱交換パイプ

しかしながら現在の量産技術では連続加工をする上で、多段の曲げ R 毎の金型（曲げ駒）を上下に移動させて連続加工を行う発想が考えられるが、物理的に加工物に干渉してしまい、結果的には図３に示した単発曲げ加工用曲げ駒を使用した「単発曲げ加工」と同様になるため、量産の製品として実現していない。

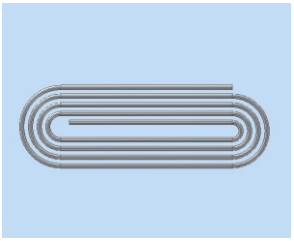


図２：渦巻き型熱交換パイプ

新たに考案した「可変曲げＲパイプ連続加工技術/加工機」を用いて渦巻き型熱交換器を製作することで高熱交換率、コンパクト、且つ低コストな熱交換器用銅パイプ曲げが可能となる。

図３：単発曲げ加工用曲げ駒

なお、現在、川下産業にて開発が進められているコージェネレーションシステム（総合エネルギー効率を高める、新しいエネルギー供給システム）の今後の需要拡大に伴う高度化された熱交換器用パイプ部品の量産化、またその多様化による熱交換器の設計自由度の観点からもプロセスの柔軟性が高い本技術開発の社会的貢献度は高いと思われる。

1－1－1. 研究目的

本研究開発の目的は、「渦巻き型」形状への加工が可能な可変曲げＲパイプ連続技術/多軸 NC 制御加工機を製作することである。さまざまな製品の形状に対応できるように本工法を確立させ、高効率給湯器に代表されるような熱交換器用パイプ部品の小型化、高性能化に寄与し、高効率給湯器の早期普及・促進を可能にする。研究の目標として、「渦巻き型」及び「蛇行型」又は渦巻き型、蛇行型の混じった「混合型」の製品を従来工法である手曲げ単発工法ではなく NC 制御加工機にて生産する。

1－1－2. 目標

1）可変曲げＲパイプ連続加工技術の確立

曲げ部動作検証モデルの製作により「一個の小さい曲げ駒」を偏芯させながら連続移動をさせて大きな曲げ半径を自在に作り出す方法を確立する。

2）多軸NC制御加工機（複動成形機）の開発・製作

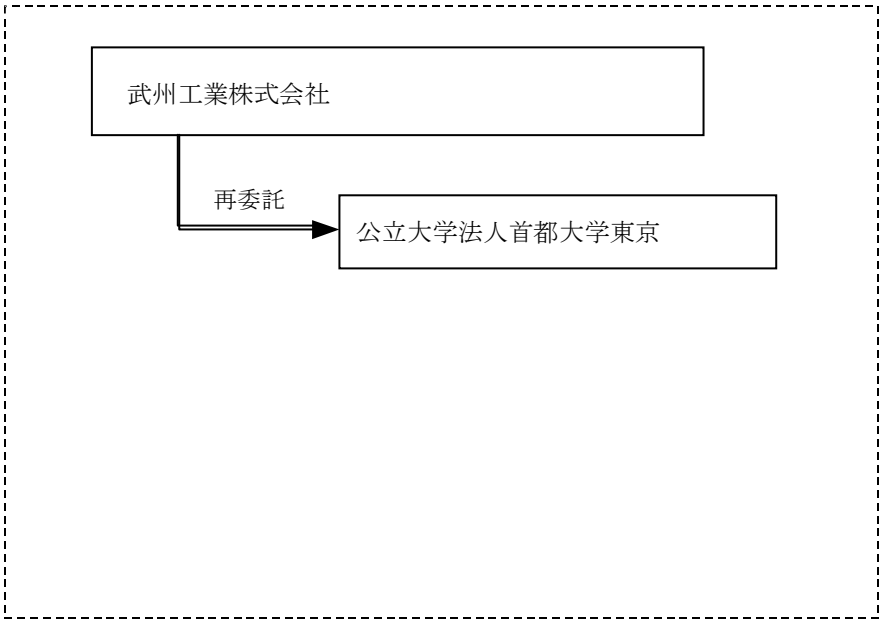
可変曲げR技術の確立とともに、「蛇行型」「渦巻き型」混合形状の加工が可能な多軸NC制御加工機を開発し、構造解析・動作解析・成形力学等の観点から研究開発を行う。機械の加工速度と加工精度の向上のため、従来の手曲げ加工による渦巻き型の加工工数(8曲げ30分)を約1/5に削減することを目標とする。

3）成形シミュレーションによる加工機の動作

平成２２年度の研究開発により図面イメージの製品が加工出来る成形シミュレーションを行うことができたため、今年度は出力を利用して加工機を動作させる。

1－2. 研究体制

1－2－1. 研究組織（全体）



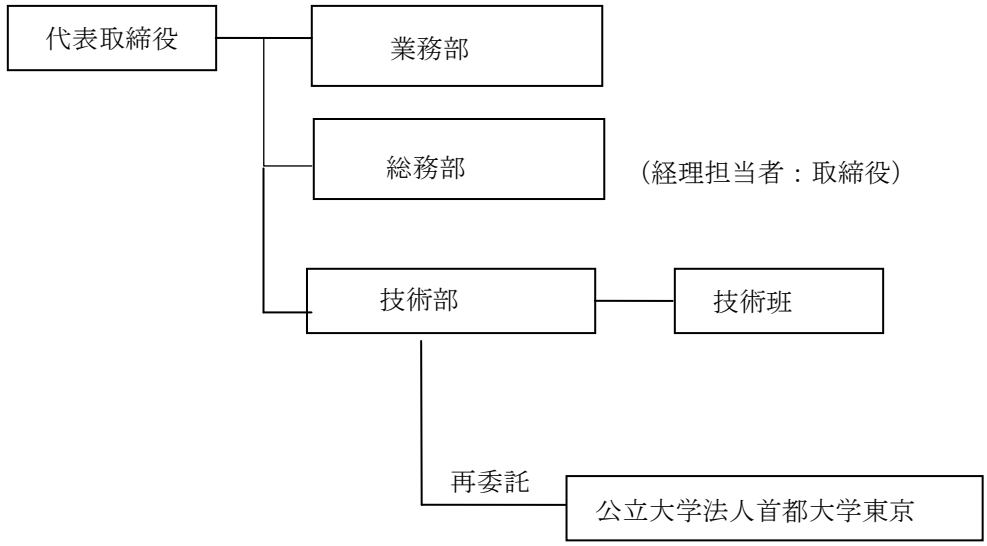
統括研究代表者（ＰＬ）
武州工業株式会社
代表取締役　林　英夫

副統括研究代表者（ＳＬ）
公立大学法人首都大学東京
理工学研究科機械工学専攻
教授　　真鍋　健一

1－2－2. 管理体制

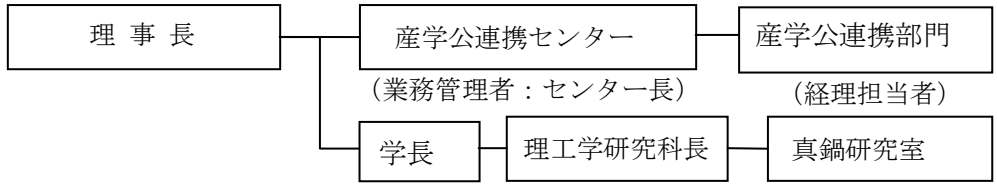
①事業管理機関

［武州工業株式会社］　（業務管理者：業務部経営企画リーダー）



② 再委託先

［公立大学法人首都大学東京］



1－2－3. 研究者氏名・協力者

研究開発推進委員会　委員

氏名	所属・役職	備考
林　英夫	武州工業株式会社　代表取締役	PL
真鍋　健一	公立大学法人首都大学東京　理工学研究科　教授	SL
古島　剛	公立大学法人首都大学東京　理工学研究科　助教	
宮岡　幸雄	武州工業株式会社　技術部　部長	
中村　正人	武州工業株式会社　技術部　班長	
奥村　裕喜好	武州工業株式会社　技術部	委
林　英徳	武州工業株式会社　業務部　経営企画リーダー	
村田　義行	高周波熱錬株式会社　製品事業部　開発企画部 副部長　博士(工学)	アドバイザー
浦川　祐二	三菱電機システムサービス株式会社	アドバイザー
古正　明	株式会社セイキテクノデザイン	アドバイザー
中村　末男	株式会社セイキテクノデザイン	アドバイザー
菅原　勝安	株式会社グローバルマシーン	アドバイザー

1－3　成果概要

1-3-1.材料の力学特性評価とシミュレーションによる高精度曲げの検討

（実施：武州工業株式会社、公立大学法人首都大学東京）

可変曲げ R パイプ連続加工技術の事業化を目指す上で実加工とシミュレーション結果を限りなく近づけることが技術課題として挙げられたため、昨年度と同様にANSYS 構造解析ソフトを用いて動作解析、材料の力学的特性の検証を行った。
また、課題となっていた高速化に関してもANSYS 構造解析ソフトを用い、高精度曲げが行える最適な曲げ動作に関しても検証を実施した。

材料（アルミ/銅パイプ）にて引張試験（JISZ2241）に基づく評価試験によって各種データ（降伏応力、応力-ひずみ曲線、n 値）を取得することができた。
上記材料の基礎データを用いて構造解析ソフトによる有限要素解析を行い、
曲げ加工を行う上で重要な要素である「スプリングバック量」に関するデータ、最適曲げ動作に関する各種フィードバックを得ることができた。

1-3-2.多軸 NC 制御加工機の汎用化（CNC 化）

（実施：武州工業株式会社、公立大学法人首都大学東京）

昨年度製作した多軸NC制御加工機は、可変曲げRパイプ連続加工を行うため、7 軸の NC 制御を駆使しているが、同時（同期）動作のできる軸は 2 軸であった為、加工動作の短縮を行う場合の障害となっていた。

加工動作の短縮（高速化）を目的として、本年度は 6 軸同時制御ができる CNC 制御装置・制御ソフトにバーションアップを行った。その結果として、多軸 NC 制御加工機にて渦巻型（計 7 曲げ）を製作する際の工数を昨年度実績であった 30 分から 6 分まで大幅に短縮することができた。ただ、目標としていた曲げ時に掛かる工数：1 曲げ当り 30 秒に対しては平均 40 秒と達成することができなかった。

また、汎用化の側面からプログラム言語に G コードを採用した結果、昨年度までは必須であった計 3 回の変換作業が要らなくなり、シミュレーターと実機の互換性は高く、パイプ曲げを行う際の補正・修正作業の操作性も格段に向上した。

1-3-3. 多軸 NC 制御加工機の高度化

（実施 ： 武州工業株式会社、公立大学法人首都大学東京）

昨年度の課題として渦巻き型のパイプ加工を行う際、曲げ加工が進むに連れ曲げ点に対して遠い位置に製品部が形成されてくる為、その自重が曲げに影響し変形することが判明していた。（4～7 曲げ目）

今年度の研究開発にて行った CNC 化で高速化は達成できる見込みであるが、高速化することにより加工中のパイプはより不安定な力を受けることが予想された為、曲げた製品部をサポートする機工『パイプ受け（保持）』を実機に追加した。パイプ受け軸の追加により曲げ動作と連動して動かす軸回転する受け皿にて製品を保持することができ製品の変形を防止し、安定した曲げ加工を作業者がサポートすることなく行えるよう実機を改善することができた。

1-3-4. 試作品の製作

昨年度の課題として曲げ部（スライド/クランプ駒）のモーター出力不足により加工力が不足し曲げ加工が安定して行えなかった為、本年度は曲げ部スライド・クランプ駒軸のモーターに 10：1 のギヤヘッドを取り付け、曲げ加工に必要な加工力を補った。結果、昨年度より 10 倍程度の加工力を確保することができた。

また、昨年度の研究開発では中心の曲げ駒の R は同じで昨年度は曲げ形状は XY テーブルの移動で可変曲げ R を実現していた為、加工スピードが遅い主原因であった。その対策として中心駒を偏芯させた曲げ駒を製作し、本曲げ駒を有効に利用することにより分割数の削減に寄与し加工スピードをより高速化することができた。

また、分割痕の減少による外観品質の向上を目指した動作プログラム（10 度曲げ、18 分割）のトライでも行い良好な結果が得られた。

ただ、本年度の研究開発では渦巻型のパイプ（図 2）の試作品にて高速化・高精度化を追及した為、計画していたその他形状（蛇行型/渦巻き型混在品）を製作することができなかった。

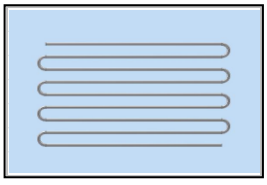


図 1：蛇行型パイプ例

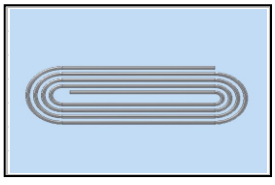


図 2：渦巻き型パイプ例

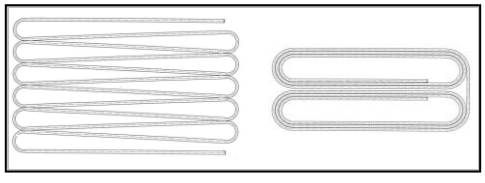


図 3：蛇行型/渦巻き型混在の一例

1－4　当該研究開発の連絡窓口

連 絡 先：担当者役職　業務部リーダー
担当者名　　林　英徳
TEL:0428-31-0167 / FAX:0428-31-3774
E-mail：h-hayashi@busyu.co.jp

第２章 本論

2-1．材料の力学特性評価とシミュレーションによる高精度曲げの検討

本年度は可変曲げRパイプ連続加工技術の「高精度化」と「高速化」を目的として、実加工機では一度の曲げ角度を2～3°としているのに対し有限要素解析では一度の曲げ角度を10°として加工速度の向上をめざしさらに管材の変位挙動を調査することで加工の高精度化を図ることを目的とした。様々な材料および管材寸法を用いた場合の管材の変形挙動の解析的調査を行い各材料および管材寸法におけるスプリングバック量のデータベースの取得することができた。さらに多軸NC制御加工機のバージョンアップに伴う仕様変更に対応した有限要素シミュレーションモデルの作成を行った。作成した解析モデルは実加工機における管材の変形と同様の傾向を示したことから管材の動的な変形挙動を予測できる有限要素シミュレーションモデルを作成することができたと言える。

2－2．多軸NC制御加工機の汎用化（CNC化）

昨年度製作した多軸NC制御加工機は、可変曲げRパイプ連続加工を行うため、7軸のNC制御を駆使しているが、同時（同期）動作のできる軸は2種類であるため、加工動作の短縮を行う場合の障害となっていた。実機の課題である加工動作（曲げ工数）の短縮を目的として、6軸同時制御が可能となるCNC制御装置・制御ソフトにバーションアップを行った。また、現在の制御装置・制御ソフトは機械動作を行うまでに計3回のプログラム言語の変換作業があり、デバック（加工品より得られた結果を加工プログラムへフィードバックする行為）が容易に行えず、汎用性の面では実用化の障壁となるため、Gコードを採用した。実機と同期させて使用する制御ソフト（シミュレーター）も高速化（CNC化）に伴い、細かな要件設定の変更・追加を実施する必要があった為、改修を実施した。また、シミュレーション結果から得られた結果データ（加工プログラム）を【G】コードにて出力する機能も実機のCNC化に合わせて追加した。

2－3．多軸NC制御加工機の高度化

前項で実施してきた汎用化（CNC化）も高度化の一部であり、汎用化の為の部品交換・組立作業に掛かる工数は本項に大部分が計上されているが本成果報告書内では記載内容の重複を避ける為、本項では改めて触れない事とし本年度新たに追加となった『パイプ受け（保持）軸』の内容を本項では記載することとする。昨年度製作した多軸NC制御加工機での課題として渦巻型のパイプ加工を行う際、曲げ加工が進むに連れ、曲げ点に対して遠い位置に製品部が形成されてくる為、製品の自重が曲げ加工に影響し、変形することが判明していた。（特に 4 曲げ～7 曲げ目に顕著な変形が見つかっていた。）

本年度の研究開発にて行ったCNC化により実機の加工スピードの高速化は達成できる見込みであったが、高速化することにより加工中のパイプがより不安定な力を受けることが予想された為、加工中のパイプに曲げた製品部をサポートする機工『パイプ受け（保持)』を実機に追加することとした。曲げ動作と連動して動かす軸回転する受け皿にて製品を保持することにより製品の変形を防止し、安定した曲げ加工を作業者がサポートすることなく実施できるよう実機を改善した。下記、本年度に開発を終えた多軸NC制御加工機の実機全体図と最終仕様を図 23. に記載します。

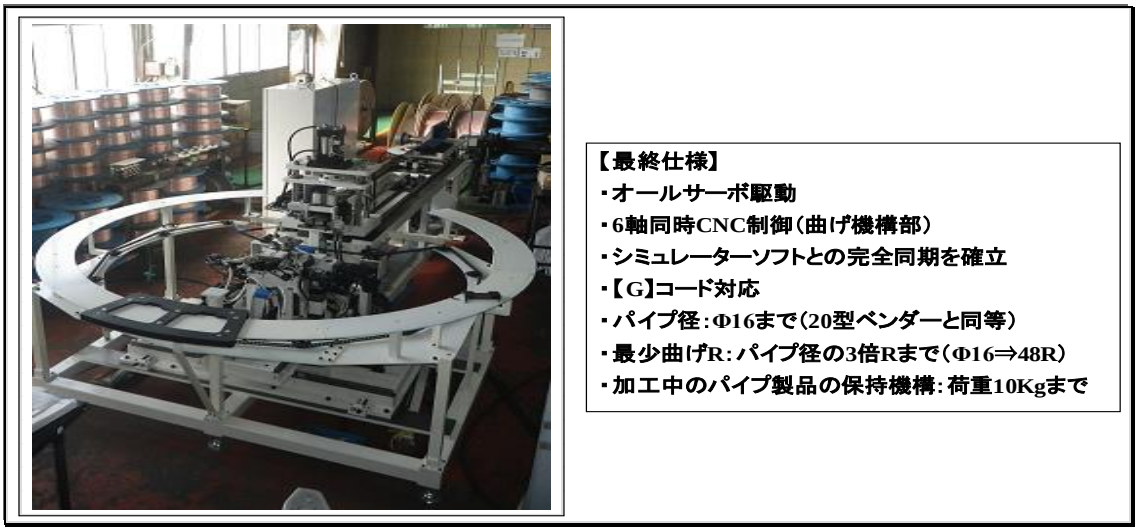


図 23. 高度化された多軸NC制御加工機全体画像

2－4. 試作品の製作

本年度に改良を行った多軸NC制御加工機を使用し、可変曲げR連続加工技術の優位性を確認・評価できるサンプル製品を製作する。蛇行型パイプ（図 24.）は現存する技術で汎用性を有する為、渦巻型パイプ（図 25.）にてシミュレーターから出力された加工データを利用し加工動作が行えるよう実機にて改良・調整作業を行った。

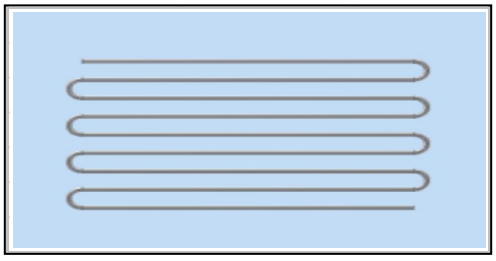


図 24. 蛇行型パイプ

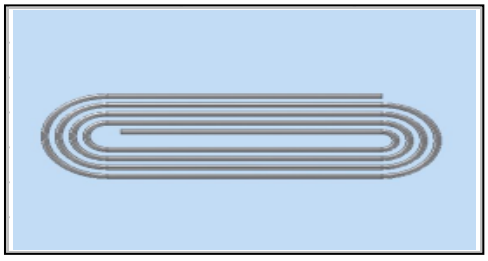


図 25. 渦巻型パイプ

本年度の研究開発にて製作した試作品サンプルを下記図 46. に示す。

≪渦巻型パイプ製品サンプル≫

【仕様】

・材質:アルミパイプO材(A3003)
・パイプ:Φ 16.0×t1.0×L5,000㎜
・サイズ:【幅】300㎜×【長さ】600㎜
・曲げR:1曲げ目:48R
2曲げ目:68R
3曲げ目:88R
4曲げ目:108R
5曲げ目:128R
6曲げ目:148R
7曲げ目:168R
・寸法精度:ピッチ間寸法±1.0㎜
・加工スピード:1曲げ平均40秒

【サンプル品の解説】

2本の渦巻型パイプを組み合わせ
(銀/青)計10mのパイプを、
【幅】300㎜×【長さ】600㎜のサイズに
納めました。

図 46. 渦巻型パイプサンプル画像・仕様一覧

2-4-1. 完成品サンプル評価

本年度に製作したサンプル品を下記 3 つの視点より評価を行った。

①可変曲げ R 連続加工技術の曲げ精度の視点
②小型化（軽量化）の視点
③低コスト化の視点

①可変曲げ R 連続加工技術の曲げ精度評価

上記、製品サンプルは多軸 NC 制御加工機を使用し、7 曲げを行った後 2 本の渦巻型パイプを互い違いに組み合わせた製品サンプルである。本サンプルが示す通り、2 本の渦巻型パイプが互いのピッチ間に収まり組み合わせっていることが確認できる。本事象より曲げ加工の寸法精度は±1.0 ㎜程度であると言える。本寸法精度は曲げ寸法の普通許容差（JISB0408）の製品寸法：300 ㎜以上 1000 ㎜以下、A 級（±0.8）と同程度の出来栄えあり、曲げ製品の寸法精度としては高精度と評価することができる。

②小型化（軽量化）の評価

本年度製作したサンプル品は幅：300 ㎜×長さ：600 ㎜のスペースにφ16.0×t1.0×L5,000 ㎜のパイプを 2 本格納することができる。一般的に熱交換機器に使用する熱交換用パイプの評価（熱交換率）はパイプの材質、パイプ径、長さによって決定されるが今回の評価は小型化である為、長さに注目し評価を行った。

②-1：条件・評価方法

使用パイプは同材質・同パイプ径（φ16×t1.0）とし、計 10m のパイプを蛇行型（各曲げRは中心で36R)曲げた場合の製品が収まるスペースを比較することとした。

今回は製品幅を比較することとし、長さは 600 ㎜に固定する。

②-2：評価結果

上記条件を元に計算するとφ16×t1.0×L10,000 ㎜を 36R にて加工した場合、製品の幅は 1,168 ㎜となることが判明した。

・蛇行型パイプの製品サイズ：【幅】1,168 ㎜×【長さ】600 ㎜

・渦巻型パイプの製品サイズ：【幅】300 ㎜×【長さ】600 ㎜

上記より、同熱交換率を得られることを前提とした場合、蛇行型パイプの方が約４分の１程度のスペースに抑えることができることが分かった。本結果より現行蛇行型パイプを使用している熱交換器と同スペースであれば約４倍の熱交換効率を得ることができるも言い換えられる。本技術は小型化だけではなく高度化にも寄与すると考えられ、高効率給湯器の多様化する開発ニーズにも広く応えることができると考えます。

③低コスト化の評価

本研究開発を事業化する為には可変曲げ R 連続加工技術を使用した製品加工の付加価値が高く、安価であることが重要と考えるが、コストの決定を総合的に弊社にて行うことはできないと考えており、今回の評価は従来技術（手曲げ単発曲げ工法）にて渦巻型のパイプ（7 曲げ）を製作した場合の開発工数/量産時（１ロット：100 ヶ）製品加工費にて比較することとした。

比較結果を表 6. に示す。

		単発手曲げ工法（過去の実績額）	可変曲げR連続加工技術（実績）
試作開発時（10セット生産）	金型費	多段式金型：1,000千円	最小曲げR用金型：250千円
	金型改修費	あり：300千円	あり：30千円
	試作加工費	@30,000×10セット：300千円	@5,000×10セット：50千円
	総額	**1,600千円**	**330千円**
量産立上げ時（100セット生産）	設備の賃率(分)	150（技術要員2名の時給より算出）	110
	加工工数	40分	6分
	歩留り	1ロット当り：50m（10ヶ相当）	1ロット当り：5m（段取り用1ヶ）
	製品加工費	**@6,600**	**@670**

表 6. 低コスト化評価結果一覧

上記結果より、製品の試作開発時の総額は従来工法と比べ約 5 分の 1 以下に抑えられることが明らかとなった。また量産立上げ時の試算では製品加工費が約 10 分の 1 以下に抑制できることが分かった。

低コスト化の評価のまとめとして、本年度の研究開発にて完成した多軸 NC 制御加工機を使用した場合、試作開発時の開発費用を抑えることができ、川下企業の多様化する設計開発ニーズ、製品評価のスピードに対し即応することが可能となったと考えます。また、量産時の製品加工費も従来技術と比べより量産性の可能性を感じさせる製品加工費とすることができたと考えております。

最終章　全体総括

１．３年間の成果について

①可変曲げ R 駒の加工動作・力学的検討

可変曲げ R パイプ連続加工技術の有限要素シミュレーションモデルの作成を構造解析ソフト ANSYS を使用し行った。加工動作の検討を行い、パイプの引きずり込みが少ない、良好な曲げ形状を得られる条件を設定することができた。初等解析によって加工条件である設定曲げ角度を算出する式を導出し、曲げ角度の設定指針を示すことができた。また材料の材料試験を行い、有限要素モデルに入力する応力ひずみデータの取得を行うことが H22 年度に行うことができた。その後、連続曲げ加工解析の基本となるベースモデルを作成し、負荷時の曲げ加工解析と除荷時のスプリングバック解析を交互に行う連続解析を実現することができた。また、それを基に実機とほぼ同条件の高精度な連続曲げ加工解析に応用した。具体的には実機の加工条件、曲げ金型寸法、位置などを解析モデルとほぼ同じ条件とし、実験でも効果があったパイプ押さえをパイプの内側に配置をすることで曲げ角度が大きいときに生じるパイプの引きずられる現象の抑制に成功した。今回の検証より得られた解析結果は実験とほぼ同様の値を示し、ANSYS を用いた解析モデルの妥当性を確認することができた。以上の結果より開発した連続曲げ加工解析モデルによって、シミュレーションにて曲げ後の形状を精度良く予測することが可能となったことは H23 年度の成果と言える。H24 年度は可変曲げ R パイプ連続加工技術の「高精度化」と「高速化」を目的として、実加工機では一度の曲げ角度を 2～3° としているのに対し、有限要素解析では一度の曲げ角度を 10° として加工速度の向上をめざし、さらに管材の変位挙動を調査することで加工の高精度化を図ることを目的とした。その後、管材の変形挙動の解析的調査を行い、各材料および管材寸法におけるスプリングバック量のデータベースの取得することができた。さらに、多軸 NC 制御加工機のバージョンアップに伴う仕様変更に対応した有限要素シミュレーションモデルの作成を行った。作成した解析モデルは実加工機における管材の変形と同様の傾向を示したことから、管材の動的な変形挙動を予測できる有限要素シミュレーションモデルを作成すること

ができた。

②可変曲げRパイプ連続加工技術の確立（H22・23年度）

可変曲げRパイプ連続加工技術の確立の為、H22年度に検証モデルを製作した。当初想定していた材料は銅パイプ　φ8×ｔ1.0であったが、加工機の能力を最小スペックとする為、φ8×ｔ0.6の材料を採用した。最小曲げRは36Rに設定し、最大曲げRは96Rとした。曲げピッチに関しては、高周波熱錬殿からの要望により現在開発を行っている熱交換器パイプと同じ10㎜とし仕様を決定の上、曲げ部動作検証モデルの設計・製作をおこなった。可変曲げ機構部分をモデル的に製作し実証実験を行うことができた。検証要件であった、曲げ駒寸法（形状）、押さえ駒寸法（形状）、スライド寸法（形状）、動作範囲、動作スピード、各軸の補間動作、直線性の確保（曲げ精度）に関しても全ての要件を検証することができた結果、H22年度の研究開発目標であった可変曲げR連続加工技術の確立に成功した。H23年度に入り開発を行った曲げ機構部動作検証用モデル機に材料送り軸を追加して右曲げの連続加工を行った。また、多軸NC制御加工機の装置スペックである曲げ駒寸法・押さえ駒寸法・スライド駒寸法・動作範囲・動作スピード・各軸の補間動作・直線性の確保等に関して本モデル機を使用し再検証を行い、平成22年度の課題を解決することができた。
結果、多軸NC制御加工機の基本動作制御アルゴリズムを決定することができた。
上記の評価・妥当性の確認としてモデル機を使用した可変曲げR連続加工による７曲げの渦巻き型サンプルを製作し、基本動作制御アルゴリズムの妥当性を証明することができた。

③可変曲げR連続加工技術シミュレーションソフトの確立（H22/24年度）

シミュレーションソフトの開発に当たっては、機械仕様に沿い各軸、付属装置の基本制御プログラム、動作スピード、各軸の役割を定義付けることができた。また、構造解析ソフトANSYSを使用し、武州にて設定した各軸の加工動作解析の結果も盛り込むことができた。シミュレーションシステムを使った加工データ入力後の完成図確認や、実加工時の干渉確認などについても当初計画した通りの仕様にて完成した。シミュレーション結果より得られた情報により補正値の入力、図面寸法の事前見直し等ができることになり、可変曲げR連続加工曲げでしかできない形状にも迅速に取組める体制が確立された。また、シミュレーションによる一連の検討作業により完成品形状が実現できたものに関してはパイプベンダーの加工用プログラムへの変換も行うことができた。
H24年度に入り、実機と同期させて使用する制御ソフト（シミュレーター）も高速化（CNC化）に伴い、細かな要件設定の変更・追加を実施する必要があった為、改修を実施した。また、シミュレーション結果から得られた結果データ（加工プログラム）を【G】コードにて出力する機能も実機のCNC化に合わせて追

加した。

④多軸 NC 制御加工機の立ち上げ（H22～24 年度）

計画当初にまとめた設備構想案に基づき、設計を進めていた各図面に対し研究開発の検証結果より得られたアウトプットを設計図面に全て反映することができた。
また、省スペースを実現する為に搭載機器の見直しも積極的に行い全長に関しては 750mm ほど当初の設計値よりも全長を短くすることができた。省エネルギーの観点からもサーボモーターを標準装備とすることで、従来の油圧パイプベンダーと比べると 45%ほど設計値予測で電力消費を削減できる設備の設計を H22 年度に完了した。
H23 年度に入り、動作検証モデル機より得られた検証データ（基本動作制御/加工プログラム/数値補正）、曲げ用金型の設計変更を盛り込み、多軸 NC 制御装置の製作を外注先に依頼した。多軸 NC 制御加工機は 12 月中旬に弊社に納品され、実機にシミュレーターより出力された加工データを入力し機構部がプログラム通り正しく動作をしているかの確認を行った。確認の結果、可変曲げ R 連続加工に必須となる 11 軸の制御に関して問題は見受けられず、曲げヘッド機構部の複雑化した動きもプログラム通りに動作することが確認できたが、実機に搭載されたパイプ保持方法では加工曲げ R が大きくなるほど形状が変形してしまい、95～180 度までの曲げ範囲では加工指示 R よりも曲げ R が大きくなる現象が見られた。本現象を改善する為には新たにパイプ保持機構の追加、基本動作制御の変更が必要であることが判明した。
上記課題に関しては H24 年度に入り、その対策として曲げた製品部をサポートする機工『パイプ受け（保持)』を実機に追加した。パイプ受け軸の追加により曲げ動作と連動して動かす軸回転する受け皿にて製品を保持することができ製品の変形を防止し、安定した曲げ加工を作業者がサポートすることなく行えるよう実機を改善することができた。また事業化の観点より設備の汎用化・高速化が課題として挙げられた為、H24 年度に実機の改造を行った。多軸 NC 制御加工機は可変曲げ R パイプ連続加工を行うため、7 軸の NC 制御を駆使しているが、同時（同期）動作のできる軸は 2 軸であった為、加工動作の短縮を行う場合の障害となっていた。加工動作の短縮（高速化）を目的として、本年度は 6 軸同時制御ができる CNC 制御装置・制御ソフトにバーションアップを行った。その結果として、多軸 NC 制御加工機にて渦巻型（計 7 曲げ）を製作する際の工数を昨年度実績であった 30 分から 6 分まで大幅に短縮することができた。ただ、目標としていた曲げ時に掛かる工数：1 曲げ当り 30 秒に対しては平均 40 秒と達成することができなかった。また、汎用化の側面からプログラム言語に G コードを採用した結果、昨年度までは必須であった計 3 回の変換作業が要らなくなり、シミュレーターと実機の互換性は高く、パイプ曲げを行う際の補正・修正作業の操作性も格段に向上した。

⑤試作品の製作（H23/24 年度）

本研究開発の目的は従来の NC ベンダー加工機では加工が困難であった「渦巻き型」形状を可変曲げRパイプ連続加工技術を使用した多軸NC制御加工機にて製作することであり、3 年間の事業を通して可変曲げ R パイプ連続加工の優位性を確認、評価できる試作品を製作することができた。また、研究開発の目的にも記載をした熱交換器用のパイプ部品の小型・軽量化、低コスト化、多様化する開発ニーズ/スピードに対応する為の技術確立も行うことができた。

２．研究開発後の課題・事業化について

３年間の委託事業を終えるにあたり、多軸 NC 制御加工機が抱える課題は更なる加工時間の短縮、加工品の高精度であると考えております。本委託事業は本年度にて終了となりますが、今後は自社にて補完研究を続けていく予定です。また、本研究開発の事業化に関してですが、平成 22 年 12 月 24 日に特許第 4653856 号【パイプ曲げ加工機およびこのパイプ曲げ加工機を使用した渦巻き型パイプの曲げ加工方法】として登録を完了致しました。また、2012 年 11 月 20～22 日に行われた東京都主催の産業交流展に出展し初めて技術/実機の PR 活動を行い、モノづくりの検討依頼から実機の OEM 生産/販売までを任せて欲しいという大手設備メーカーからのオファーまで、初めての PR 活動としては高評価であったと考えております。2013 年度も補完研究を続けながら、可変曲げ R 連続加工技術の PR 活動を展示会・HP 上にて行い、本技術が確立されていることを外部に発信していきたいと考えております。

「この報告書には、委託業務の成果として、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、通例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Ⓐ
この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。