

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「任意形状付シームレス極細パイプの高精度
加工技術の確立及び高効率製造装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人栃木県産業振興センター

目 次

第1章 研究開発の概要	2
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1-2 成果概要	3
1-3 事業化（実用化）に向けた取り組み	4
1-4 研究体制（研究組織・管理体制・研究者氏名・協力者）	6
1-5 当該プロジェクトの連絡先	9
第2章 成形加工法の課題	10
2-1 開発の経緯	10
2-2 成形加工法の開発	12
第3章 最適加工条件への対応	17
3-1 シミュレーションによる評価技術の開発	17
3-2 最適素材開発の実験的探索	24
第4章 生産性の高い製造装置開発の課題	28
4-1 極細パイプ加工装置の開発	28
第5章 プロジェクトのまとめと今後の取り組み	32

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

1-1-1 研究の背景

糖尿病で治療を受けている患者は全国に247万人おり、治療を受けていない「潜在」糖尿病患者も含めると740万人と推定されている(2005年厚生労働省調べ)。急速な高齢化に加えて、食べすぎ、運動不足、ストレス、アルコールの飲みすぎなど、現代社会が抱える生活習慣そのものが糖尿病の大きな原因になっている。そのため、糖尿病患者数はH14からH17の3年間で8%も増加しており、同じ期間における高血圧性疾患(2.8%減)、脳血管疾患(6.8%減)、悪性新生物(0.8%増)などの主な傷病と比較すると、その増加振りが際立つ。世界規模で眺めてみても、糖尿病患者数は2.46億人(2007年)から3.80億人(2025年推計値)に急増すると予測されている(WHOのデータ)。

糖尿病治療の大きな柱の一つとして薬物療法が挙げられ、なかでもインスリンを注射で補充するインスリン療法が代表的治療法である。インスリン注射は、患者自ら1日数回行う自己注射型が一般的である。そのため、自ら注射するという心理的恐怖心も加わってインスリン自己注射治療に抵抗感を抱く患者が大変多い。

注射針はその外径が細くなるほど注射の際の苦痛の軽減につながる。そのため、より針先径の小さな低痛型の注射針の登場が望まれている。しかも、全世界的に増え続ける患者に対して苦痛の低減のみならず、治療費の低減にもつながる低コストなインスリン自己注射用の極細注射針の提供が、患者ならびに医療関係者、医療器具・医薬品メーカーから望まれている。

1-1-2 研究の目的及び目標

本研究開発は、カーリング加工に代えて継ぎ目が現れる心配のないステンレス製シームレス極細パイプを素材として用い、外径φ0.18mm(34ゲージ)以下の任意テーパ形状付極細パイプにつぼめ成形できる加工技術の開発、ならびにその量産製造技術の開発を行うことにより、従来のカーリング型加工による低痛型注射針製造技術に対して、継ぎ目がなく、より刺通抵抗の低い注射針の成形技術を確立する。加えて、コスト低減40%以上を目指すとともに、シームレスパイプを素材として用いることによってさらなる極細化が容易になるので、現在ではまだ製品化されていない針先外径が0.18mm以下のより低痛型インスリン自己注射用注射針の提供を実現する。

なお、具体的な目標値は下記のとおりである。

(1) インスリン自己注射用注射針応用としての目標値

形状目標：継ぎ目による凹凸を針先に生じない、任意形状テーパー付パイプ

針先外径：0.18mm(34ゲージ)以下

材質：ステンレス(SUS304, 従来品と同等)

(2) 高能率と低コスト化への目標値

生産速度：毎分300本の生産可能な製造装置の開発

単価目標：従来製品の60%以下の製造単価2.0円/本の実現

1-1-3 研究の概略

従来の極細テーパー付パイプ製造法は、母材である板材を金属プレス加工でパイプ状にカーリング加工し、継ぎ目をレーザー溶接加工後、歪みを取り、プレスレイアウトから切り離して製品化している。継ぎ目に溶接加工を用いないと針が曲がった時（実際に注射した時に発生する若干の撓み等）に、薬液が漏れる隙間が発生してしまうため、溶接加工は必要不可欠の作業工程となっている。しかも、その溶接加工は、細管部を対象とするため高精度を要し、また、専用の生産設備が必要となるため膨大な資金が必要となる。このように加工工程数と設備費の増加のため自ずと製品単価が上がってしまい、大量生産及び低コスト化のニーズの中で最大のネックとなっているのが現状である。

本研究開発では、板材ではなく極細のシームレスパイプ材を素材として用い、これをつぼめ成形により任意テーパー形状付極細パイプに高効率、高品質で成形する技術を開発し、インスリン自己注射用低痛型注射針製造技術としての応用を目指す。また、その加工を量産技術として実現できるプロトタイプ加工装置の開発を行う。

1-2 成果概要

本研究を進めるにあたっては、各サブテーマに目標を定め研究を進めている。また、段階的に進めるため年度ごとにもそれぞれ目標を定めてきた。本年度の各サブテーマの成果について次のように報告する。

(1) 成形加工法の課題

試作金型Ⅱの立上げを進めると同時に試作搬送装置Ⅱとの組合せを行ってきた。加工工法の開発にあたっては、製品化を目指す上で品質上の問題はクリアしたが、生産性の面で課題が残っており今後も研究開発を進める必要がある。

(2) 最適加工条件の課題

シミュレーションを行うにあたっては、回転させた場合での評価が可能になったことで幅が広がった。特に、ダイス形状を検討するにあたっては非常に有効なデータとする事が出来た。また、素材の改良も必要とするデータを収集することができ有意義な期間であった。

(3) 生産性の高い製造装置開発の課題

製造装置に要する各要素技術の研究を進め、試作搬送装置Ⅱの開発を行った。要素技術の研究を事前に行ってきた事もあり、予想を上回るスペックの試作搬送装置となった。また、微細なワークを取り扱う装置を開発することへの難しさも改めて痛感した。今後も更なる精度向上と高速化を追求した装置とするよう研究を進めていく。

1-3 事業化（実用化）に向けた取り組み

1-3-1 事業化（実用化）目標

本研究開発により実現する任意形状テーパー付シームレス極細パイプの注射針化の技術開発は、ステンレス製シームレス極細パイプを素材として用い素材の供給・加工等すべての工程を無人で製造することにより、現行のプレス加工及びレーザー溶接加工を要する製造方法に比べ、溶接継ぎ目の微妙な凹凸による痛みをより低痛化し、さらに手間のかかる工程の削減により、大幅な製造時間の短縮とコスト削減が可能となる画期的な新たな工法である。このため、事業化にあたっては特許出願をおこない知的財産として確保する。

事業化の具体的目標としては、任意形状テーパー付シームレス極細パイプを注射針市場に展開するにあたり、現行の製造法で作られている極細テーパー付パイプを注射針化した製品の製造原価が3.5円以上で、一般的なインスリン用注射針の製造原価1円～2円と比べかなり高価なものとなっているため、製造原価の目標を2円に設定しコスト低減40%以上を目指す。

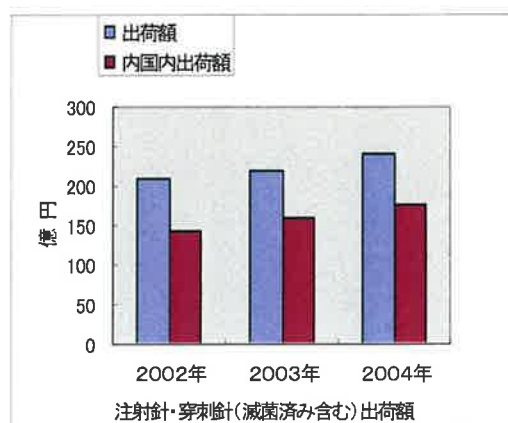
また、厚生労働省の「薬事工業生産動態統計年報」によれば、医療用注射針・穿刺針の出荷額は、下図に示すように2002年が210億円（内国内144億円）、2003年が220億円（内国内159億円）、2004年が241億円（内国内177億円）と約5～10ポイント（うち国内にあっては10ポイント以上）の伸びを示しており、今後も順調な伸びが期待される。

そこで、本研究開発によってでき上がった任意形状テーパー付極細パイプについてインスリン用注射針分野での市場展開を目指し、当初の生産を0.5億本/年（製造原価1億円

/年)、さらに毎年設備の増設を行うことにより、5年後には4.2億本/年(製造原価8.4億円/年)の生産をすることにより、現状のインスリン用注射針の国内生産数30億本/年(川下企業であるニプロ(株)調べ)の国内シェア14%の取得を目指す。

1-3-2 事業化(実用化)実施体制

本研究による事業化は、プレス加工及びレーザー溶接加工を要する現行の製造方法に比べ、溶接継ぎ目の微妙な凹凸による痛みをより低痛化し、さらに製造工程が4工程から1工程になることから製品の高付加価値化に加え、大幅な時間の短縮とコストの削減が可能となる。このため、事業化にあたっては、下記のような協力体制の下、各々の実施企業が有する固有技術を活かしながら実施する。



【資料出所:厚生労働省「薬事工業生産動態統計年報」】

(1) 日新製鋼株式会社【最適なステンレス鋼の供給】

日新製鋼株式会社は鋼材メーカーとして鋼材の機械的性質や化学的性質等の調整、成形時に生じるひずみ等のシミュレーション技術を有するため、事業化にあたっては、テーパー付シームレス極細パイプ材料としての諸条件を考慮した最適な材料(ステンレス鋼)を供給する。

(2) 株式会社チュウリツ【高能率生産装置の製造・納入】

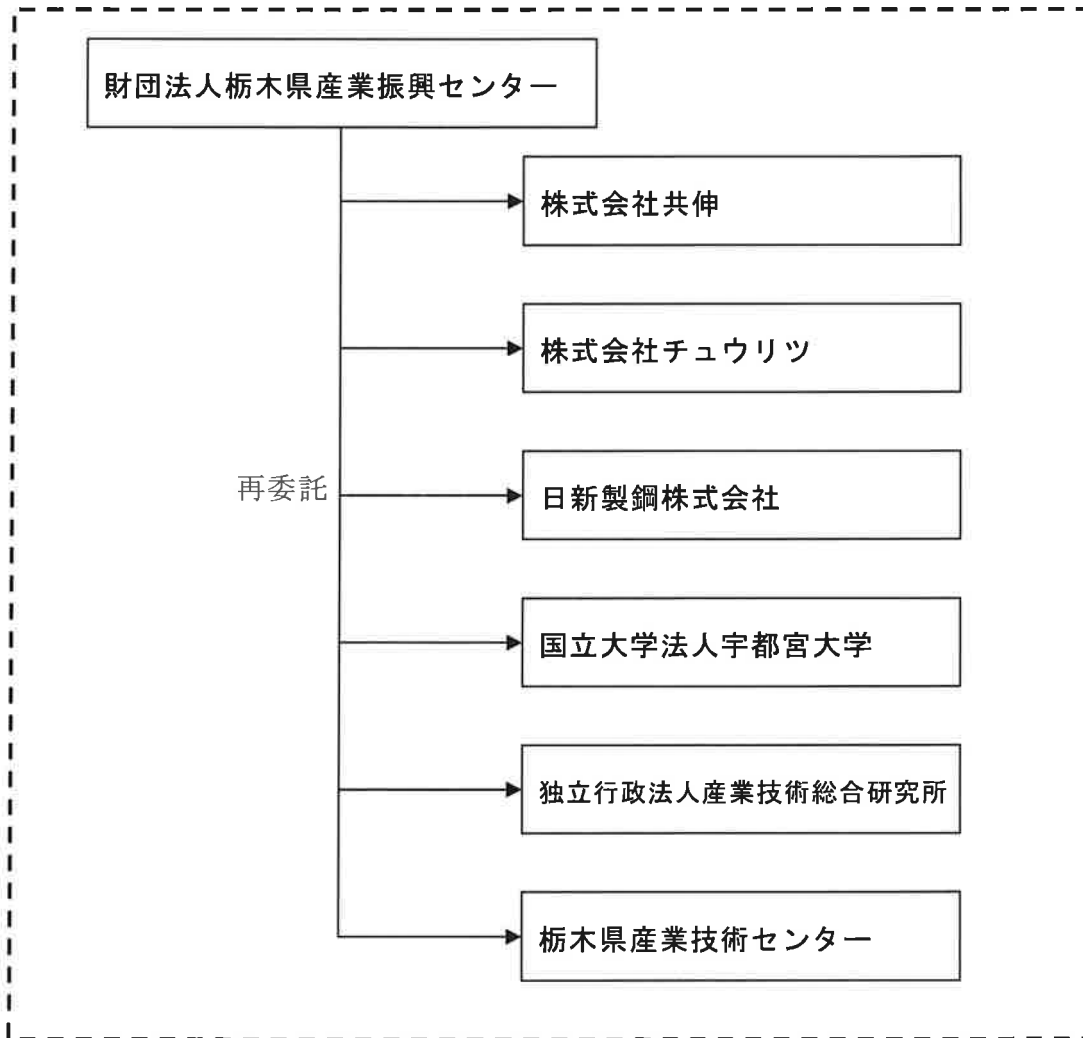
株式会社チュウリツは各種省力化機器の開発・設計を主に精密加工・組立等の技術を有するため事業化にあたっては、任意形状付シームレス極細パイプに係る生産設備として、当社が設計・開発を担当する高能率生産装置を製造し株式会社共伸に納入、メンテナンスを行う。

(3) 株式会社共伸【新工法による任意形状付シームレス極細パイプ注射針の生産】

株式会社共伸は、生産金型の設計・製造技術や超微細プレス加工技術等の高度な生産技術を有するため、事業化にあたっては、今回の研究で開発する新工法により任意形状付シームレス極細パイプ注射針を生産する。

1-4 研究体制（研究組織・管理体制・研究者氏名・協力者）

1) 研究組織（全体）



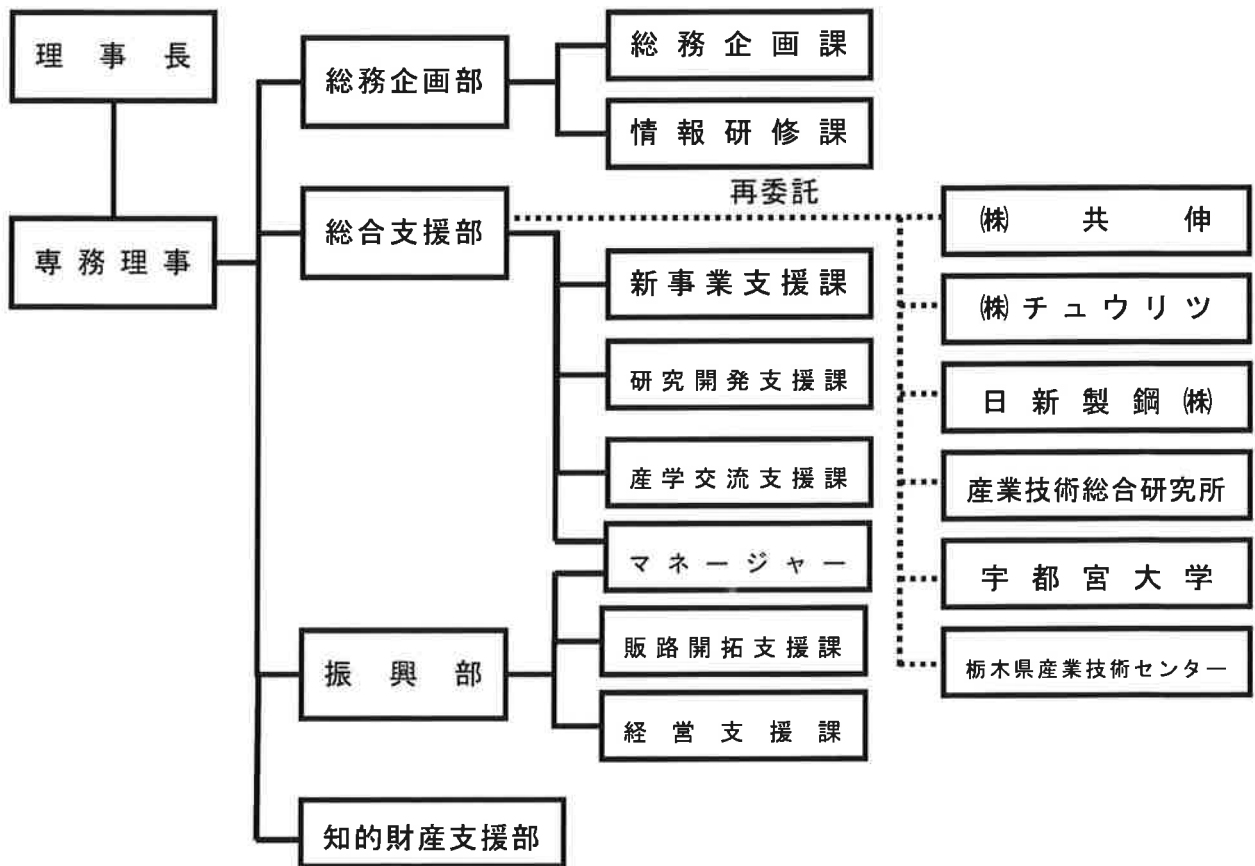
総括研究代表（P L）
株式会社 共伸
代表取締役社長 前田 真作

副総括研究代表者（S L）
国立大学法人 宇都宮大学
助教 白寄 篤

2) 管理体制

① 事業管理者

[財団法人栃木県産業振興センター]



3) プロジェクト管理員及び研究員

【管理法人】

- ・ 財団法人栃木県産業振興センター

管理員（プロジェクト管理員）

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
乾 晃	総合支援部 部長	④
横塚 勝	総合支援部研究開発支援課 課長	④
橋本 裕二	総合支援部研究開発支援課 副主幹	④
坂本 憲弘	総合支援部研究開発支援課 係長	④

【再委託先】

株式会社 共伸

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
前田 真作	代表取締役社長	①-1、①-2、②-1、②-2
相馬 一美	営業グループ 営業課長	①-1、①-2、①-3、②-1、②-2、③-1、③-2
廣田 淳	営業グループ 営業課	①-1、①-2、②-1、②-2、③-1
花山 次夫	製造グループリーダー	①-1、①-2、②-2、③-2
月井 裕明	営業グループ 企画課	①-1、①-2、②-3、③-1、③-2
桑原 信和	営業グループ 企画課	①-1、①-2、③-2
益子 祐介	営業グループ 企画課	①-1、①-2、②-3、③-1、③-2
前田 政雄	会長	①-1、①-2、③-1

株式会社 チュウリツ

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
山口 貴司	代表取締役社長	③-1、③-2
石川 篤一	常務取締役 開発・設計技術総括	③-1
斉藤 志郎	開発・設計事業部	③-1
鶴野 章次	開発・設計事業部	③-1
中山 勝実	開発・設計事業部	③-2

日新製鋼 株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
西村 泰司	ステンレス・SP商品開発チーム	②-1、②-2、②-3

国立大学法人 宇都宮大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
白寄 篤	大学院工学研究部循環生産研究部門 助教	②-1、②-2、②-3

独立行政法人 産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
碓井 雄一	デジタルものづくり研究センター 加工基盤技術研究チーム 主任研究員	①-1、①-2、①-3

栃木県産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
柏崎 親彦	機械電子技術部機械システム研究室 特別研究員	①-1、①-2、③-1、③-2
江面 篤志	機械電子技術部機械システム研究室 技師	①-1、①-2、③-1、③-2

表中の実施内容は下記のとおりである。

- ①-1 任意形状テーパー付極細パイプの加工工法の開発
- ①-2 精密パイプ成形用精密金型による加工条件の確立
- ①-3 微細化に向けた金型コア部の研究開発及びデータベース構築
- ②-1 シミュレーションによる評価技術
- ②-2 最適素材開発の実験的探索
- ②-3 形状のニーズに対応するためのデータベース構築
- ③-1 極細パイプ加工装置の開発・チャック・搬送・整列の構想
- ③-2 システム化技術の開発
- ④ プロジェクト管理・運営

1-5 当該プロジェクトの連絡先

財団法人栃木県産業振興センター

〒321-3224 栃木県宇都宮市刈沼町369番地1

第 2 章 成形加工法の課題

2-1 開発の経緯

2-1-1 はじめに

インスリン自己注射用の注射針の小径化に対するニーズの高まりから、最近、「痛くない注射針」と銘打って針基外径が $\phi 0.35\text{mm}$ で針先外径が $\phi 0.20\text{mm}$ という段付きの注射針が登場し、患者の苦痛低減に大きな貢献を果たすようになってきている。こうした 2 段のテーパ付パイプ形状をもつ極細注射針の製造には、カーリング加工に通常の順送りプレス技術が使われている。

カーリング加工が含まれるとパイプの長手方向に継ぎ目ができてしまう。針先の研削・研磨後、針先にはこの継ぎ目断面が露出してくるため、針先を皮下に挿入した時に露出した継ぎ目の微妙な凹凸が神経を刺激するため、痛みの点では必ずしも期待したほどの低痛化効果が得られないのが問題になっている。そのため、川下産業からは継ぎ目のない極細注射針の開発が強く川上産業に要請されている。

2-1-2 基礎研究

前記したような問題を解決するために、シームレスパイプの成形技術を確認し品質の安定した注射針の開発を進めてきた。シームレスパイプから、段付き形状の注射針を成形するには一定の径を拡張する加工方法と、径を縮める縮管加工が考えられるが、コストを抑えるための量産性と品質の安定を考慮し縮管加工での基礎実験を進めてきた。

2-1-3 試作金型の製作（平成 19 年度）

基礎実験で行ってきた成形法から量産に向けて最適な方法を選び、量産に向けた加工工法を確立する。目標としては、できる限り短工程・短時間で成形が可能であること、成形による割れが発生せず、強度を保持する上から肉厚の変化が 10% 以内に収まることとした。

基礎研究で進めてきた成形法から以下の 3 種類の加工法に絞り込みを行い、試作金型を製作し開発を進めてきた。実験に使用するプレス機械は、ストローク中の任意な位置で速度を制御でき、ストローク長も任意で制御できるデジタル電動サーボプレスを使用し、加工条件のデータの収集として加圧力はロードゲージを用いて測定を行い温度に関しては温調機で監視しデータベース作成の基礎データとして蓄積を進めてきた。

2-1-4 試作金型による実験と試作金型Ⅱの製作（平成20年度）

昨年度製作した3種類の試作金型を用い任意形状テーパ付極細パイプの加工工法の開発を行うとともに、生産性の向上、品質の安定、目的とする製品化への評価を行った。評価を進めてきた結果、特に量産性の面でタイプAの工法で優位性があることが分かり、高効率生産に対応可能な試作金型Ⅱの設計製作はタイプA工法をベースに開発を行った。（図2-1）試作金型で発生した不具合の対策内容を盛り込むと共に、高効率製造装置との組合せを考慮しなければならないため、金型設計の段階ではチュウリツとの密な連携を図り開発を進めてきた。また、試作金型タイプCについては産業技術総合研究所と共同で実験データの採取と加工条件の検討を進めてきた。その結果、ダイスの形状を変えることでサンプルレベルでの成形は可能とする事が出来た。



図 2-1 試作金型Ⅱ

2-1-5 平成21年度に向けての課題

試作金型Ⅱの早期立上げを行うと共に、試作搬送装置の評価を進めトータル的な高効率製造装置の開発を行う。また、サブテーマ2と並行して評価を進め、シミュレーションによる評価ではパイプを回転させた場合での検証を継続して進める。素材の改良、また新素材の開発に向けては基礎データが不十分なので、引き続きサンプル材での評価を進め、方向性を見出すことにする。タイプCについては、加工工法についての見極めが不十分であることから引き続き産業技術総合研究所と共同で実験を進める必要がある。

2-2 成形加工法の開発

2-2-1 はじめに

成形加工法の確立に当たっては、本プロジェクト開始前の基礎実験から平成20年度に行った試作金型での実験を含め様々な加工工法、加工条件を試みてきた。その結果を集約し平成20年度に試作金型Ⅱを開発したが、品質の問題や生産性の問題が残っておりすべての課題が解決されているわけではない。使用する設備、金型、パイプ、パイプの基となる素材、加工油等の条件の見極めを早急に進め、安定した品質で生産性の高い装置として確立する必要がある。

2-2-2 試作金型Ⅱによる成形加工法の開発

(1) 試作金型Ⅱの立上げ

試作金型Ⅰで絞り率を考慮し複数回で成形する方法で実験を進め、試作金型Ⅱでは複数の成形工程をひとつの金型に集約した。試作金型Ⅱの加工工程については、試作金型Ⅰと同一の絞り率で立上げを開始したが座屈の問題が発生し加工不可であった。原因として考えられるのは、金型精度の問題とダイス形状の問題があげられる。金型精度については3次元測定機を用い上型、下型共に基準位置からの各部寸法を再度チェックしたが各部共に2～3 μm の誤差であり加工上問題の発生するような精度の狂いは確認されなかった。

座屈の対策として、ダイスの角度を試作金型Ⅰに合わせる事も検討したが、曲がりの問題解決を優先し別な観点から対策を検討した結果、絞り工程を変更し絞り率を変えることで $\phi 0.18\text{mm}$ までの成形が可能となった。

(2) 曲がりの対策と検証

①ダイス形状の変更

平成20年度の報告書で述べたように、試作金型Ⅰで曲がりに対する検証を進める中で、ダイスの形状が曲がりに対し大きな要因であることが判明している。

アプローチ角度を開く事によって成形時の抵抗は緩和され成形しやすくなるが、その反面曲がりに対しては悪影響を及ぼしている。逆にアプローチ角度を出来る限り小さくすることで成形時の抵抗は大きくなるが、曲がりを最小限に抑えられる事が出来る。その為、試作金型Ⅱでは試作金型Ⅰに対し、現時点で加工可能とされる最少角度で設計製作を進めてきた。試作金型Ⅱで実験を進め曲がりの状況を確認した結果、試作金型Ⅰで成形したサンプルの曲がり量と比較すると数 μm は改善されたものの、目標とする曲がりゼロには至らなかった。

②工程数と曲がりの関係

工程数による曲がりの検証は、平成20年度にも行ってきたが今年度は試作金型Ⅱを立ち上げたことで金型条件や加工方法も変わっている事から再度同様な検証を進めてきた。

試作金型Ⅱは高効率での加工を目標としているため3本同時に同一工程を成形出来る構造としている。但し、加工ステージ3カ所が全くの同一条件とは言えない事から各評価については3カ所を別々に評価する必要がある。工程数による評価に関しても同様に3カ所のステージを個別に評価した。

③同サイズのダイスでの検証

曲がりの要因のひとつが金型パーツの精度であるという事はこれまでの実験で判明しているが、同じ金型パーツであればステージを変更しても同様な曲がりが発生するのかを検証した。

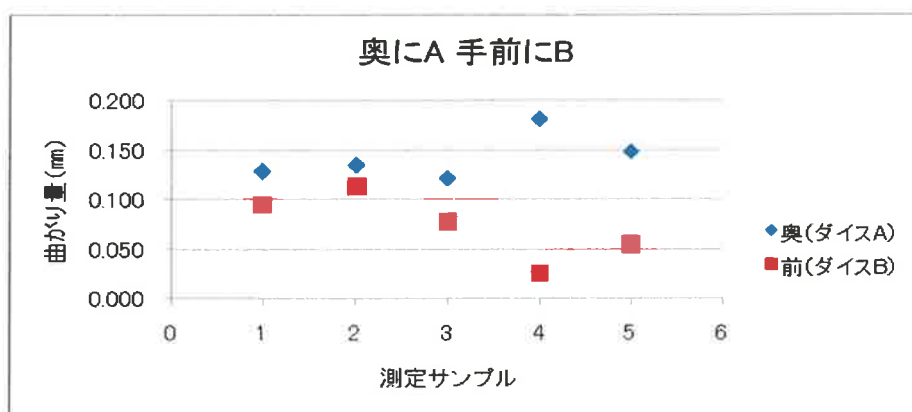


図 2-2 同一パーツでの検証 (1)

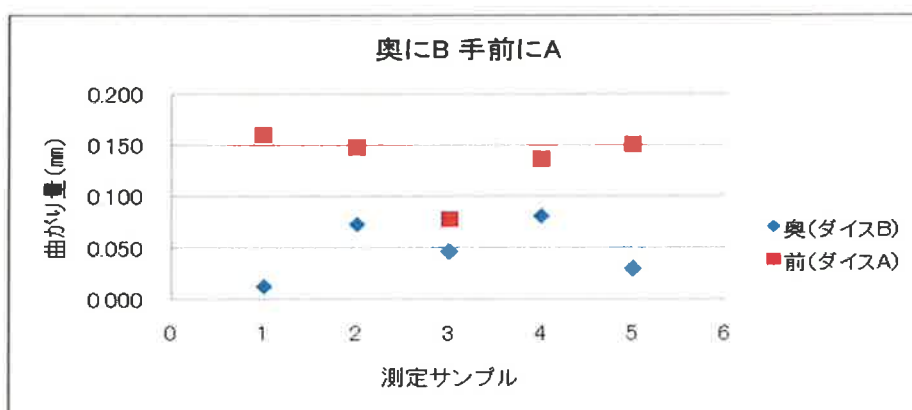


図 2-3 同一パーツでの検証 (2)

実験の結果、《奥》《前》というステージの差より《ダイスA》《ダイスB》の差が大きく出ている。同一サイズのパーツを使用しても曲がりの状況が変わってしまう事が分かる。実験に用いた各パーツは同一条件で機械加工しているが、最後の鏡面仕上げの工程は機械加工ではなく人の感覚による手仕上げになる為多少の誤差が発生してしまうと考えられる。また、金型の測定方法についても確立されていないため、実際にパイプを成形しダイスの良否を判断するしかない状況である。(図2-2、図2-3)

④アニール処理後の曲がり

パイプの素材での評価は最適素材開発の実験的探索で報告しているが、通常流通しているSUS304をアニール処理し硬度を下げた状態で曲がりが改善されるか実験を行った。

今回の実験では大きな改善は見られなかったが、最適素材の開発と併合して結果について協議を進める事とした。

(3) 曲がり修正を検討

これまで、曲がりの修正について様々な要因の検証を進めてきたが、いずれも決定的な対策の構築には至っていない。現行の技術の中では金型パーツの詳細寸法の測定や素材特性の均一化など不可能な検証・対策案も含まれている事から、すべての工程において曲がりゼロを目指す目標から、途中工程での曲がりをコントロールしながら最終的な製品寸法(φ0, 18mm)の時点で曲がりゼロを目指す事を目標とし研究を進める事にした。

①タイプCの工法との組合せによる修正

産業技術総合研究所では、共伸の試作金型Ⅱの立上げと並行しタイプCの工法について実験を進めてきた。その結果、ダイス形状の見直しとパイプの回転数等を見直す事によって加工部長さ10mmで成形する事が可能となっている。(図2-4)しかも共伸で行っているタイプAの工法を採用した試作金型Ⅱで加工したサンプルより格段に曲がりの量が少なくなっている事から、試作金型Ⅱの最終工程にタイプCの工法を取り入れることで曲がりの改善に効果がないか検証を行った。

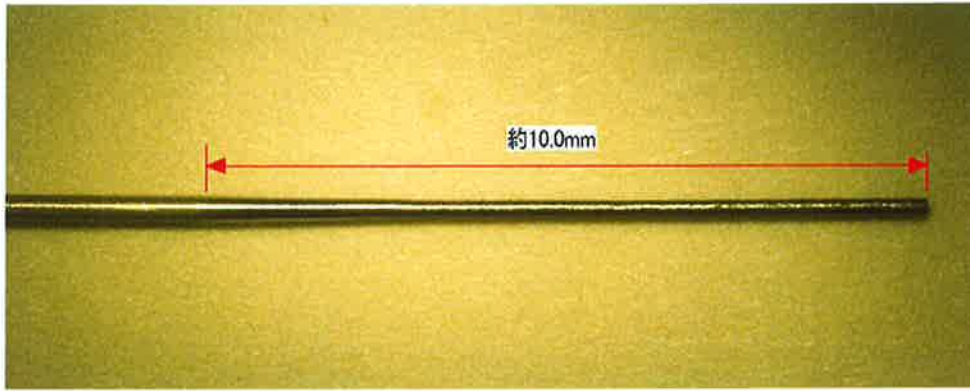


図 2-4 タイプCで加工したサンプル (産業技術総合研究所)

検証は、試作金型Ⅱで途中工程まで加工し最終工程をタイプCで成形するが、途中工程のサイズを3パターン準備し最終工程の絞り量を変化させて違いを観察した。

その結果、 $\phi 0.22\text{mm}$ から $\phi 0.20\text{mm}$ のように少ない絞り量で加工するより、 $\phi 0.25\text{mm}$ から $\phi 0.20\text{mm}$ とある程度の絞り量を有している方が、 $\phi 0.20\text{mm}$ の段階では曲がり量が少なくなる事が判明した。

2-2-3 まとめと今後の課題

これまでの実験結果から、任意形状付き極細シームレスパイプの加工工法の開発についてまとめてみた。基礎実験の段階から3種の加工工法での研究を進め高効率製造装置に一番最適な工法として成形加工法タイプAを採用したが、結果的にはタイプAの工法のみでは曲がりの問題を解決する事が出来なかった。曲がりの要因分析については出来る限り洗い出しを行い検証・評価を進めてきたが、ダイスの形状測定の方法確立が難しい点や、ダイスの加工方法では機械加工の工程と仕上げによる工程が入る為、個々の仕上がりが均一にならず形状の差が大きくなってしまった。したがって、ダイスの出来次第で評価する事になり一定の条件下での評価が困難であった事が問題解決に至らなかった要因として挙げられる。

しかしながら、並行して成形加工法タイプCの実験評価を産業技術総合研究所と共同で進めてきた事により、ひとつの工法にとらわれず対策を講じる事が出来た事は大きな成果であり、プロジェクト開始時に掲げた目標に近づけるための大きな役割を果たした。

最終的に、成形加工法タイプAで途中サイズまで加工しタイプCの工法で目的とするサイズに加工することで、製品化にむけて問題のない曲がり量まで改善する事が出来た。曲がり量の評価については、実際に刃先の研磨を行いながら進めてきた。(図2-5、図2-6)

今後の課題として、成形加工法タイプA、タイプC共に毎分300本/分の目標には程遠いことから生産速度の改善が必要となる。また、タイプAとタイプCを複合させた製造装置の開発も必要となるが、既存の設備や装置にとらわれることなく幅広い分野から優れた要素技術を集結させる事が目標達成には不可欠である。



図 2-5 成形サンプル



図 2-6 研磨による曲がりの評価

第3章 最適加工条件への対応

3-1 シミュレーションによる評価技術の開発

3-1-1 はじめに

平成20年度に行った検討では、主にタイプAの場合について、応力-ひずみ曲線の改善などを行い、実際の加工結果に近いシミュレーション結果を得ることができた。また、ダイスを回転させるタイプBのシミュレーションを実施できることも確認した。しかし、細め加工された極細パイプを、注射針として研磨加工する場合の問題（曲がりの問題）や注射針としての機能を高める方向性（加工後の内径確保の問題など）の検討については不十分であった。その一方で、産業技術総合研究所における実験では、平成20年度にタイプCの金型を改善し、加工後の内径を比較的大きく保てることが明らかになった。そこで、平成21年度のシミュレーションでは、タイプCについての検討を追加し、管細め加工に及ぼす金型形状の影響や、加工後のパイプ材の特徴などを明らかにすることにした。結果的には、加工後のパイプ材のひずみ量が、タイプAよりもタイプCで大きいことや、加工後の内径をなるべく大きく確保するためにはタイプCの方が良いことなどを明らかにすることができた。

3-1-2 研究の方法

平成19年度・20年度と同様に、動的陽解法に基づくソフトウェアLS-DYNA（アメリカ・Livermore Software Technology Corporation 製）を使用してシミュレーションによる検討を行った。

3-1-3 結果及び考察

【シミュレーションにおけるパイプの回転速度設定などについて】

図3-1にシミュレーションにおける回転速度の設定（約2倍速および約6倍速）の影響を示した図を示す。平成21年度には種々のダイス形状でのシミュレーションを実施したが、回転速度の設定の影響については、平成20年度に産業技術総合研究所で作製したダイスについてのみ早い時期に検討を行い、その後のシミュレーションに適用した。一般に、シミュレーションでは、可能な限り計算にかかる時間を節約することが行われる。しかし、ここで、タイプCのシミュレーションでは、パイプ材を回転させるので、パイプ材を1/2モデルや1/4モデルなどにして要素数を減らすことができない。そこで、回転速度の設定を速めることで計算時間を短縮することを試みた。約6倍速の設定では、図3-1に示すように、回転させている

パイプ材が加工中に振動し、その振幅が徐々に大きくなり、パイプ材が折れ曲がる結果となった。タイプCでは、パイプ材とダイスとの接触面積が小さく、パイプ材の変形を拘束する境界がほとんどないこともあり、またさらに、本研究で使用しているソフトウェアが動的陽解法に基づくものであることもあり、シミュレーション結果にパイプ材の回転速度の影響が大きく表れたと考えられる。速度を落として約2倍速の設定では、約6倍速の場合よりも加工が進んだところまでの計算結果が得られた。そこで、加工速度の設定をさらに1倍速まで落とし、計算時間をかけて得られた結果が図3-2である。回転速度は1000rpmの場合に相当する。初期外径 $\phi 0.35\text{mm}$ のパイプ材を $\phi 0.24\text{mm}$ まで細め加工するシミュレーションができたが、産業技術総合研究所での実験結果として得られた最小外径には及ばなかった。シミュレーション結果が実験結果に及ばなかった原因には、シミュレーションで使用している金型とパイプ材との接触判定手法の影響やモデルのメッシュサイズの影響やパイプ材の変形量の大きさなども考えられる。本検討では、シミュレーションにかかる時間を短縮させる方法や、シミュレーション結果が実験結果に及ばない原因を追求することよりも、それなりのシミュレーション結果が得られるのであれば、得られた結果の範囲での検討を先に進めながら問題解決に当たることとした。なお、シミュレーションで使ったPCの仕様は、OS: Windows XP Professional、CPU: Intel Core2Quad Q9400 2.66 GHz、メモリ: 3 GB であり、1つのシミュレーション結果を得るためにかかる計算日数は5日程度であった。

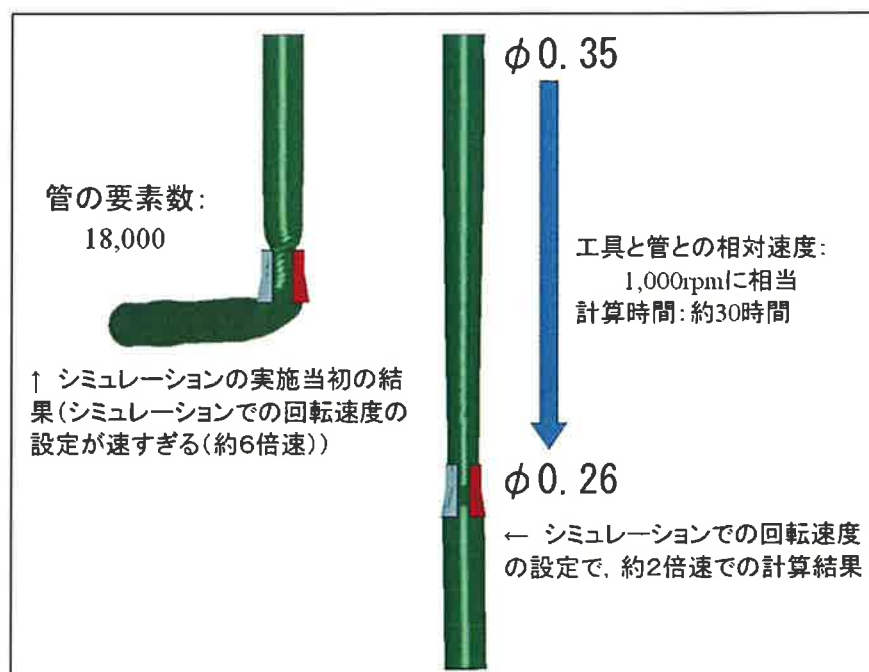


図 3-1 シミュレーション上での回転速度設定の影響

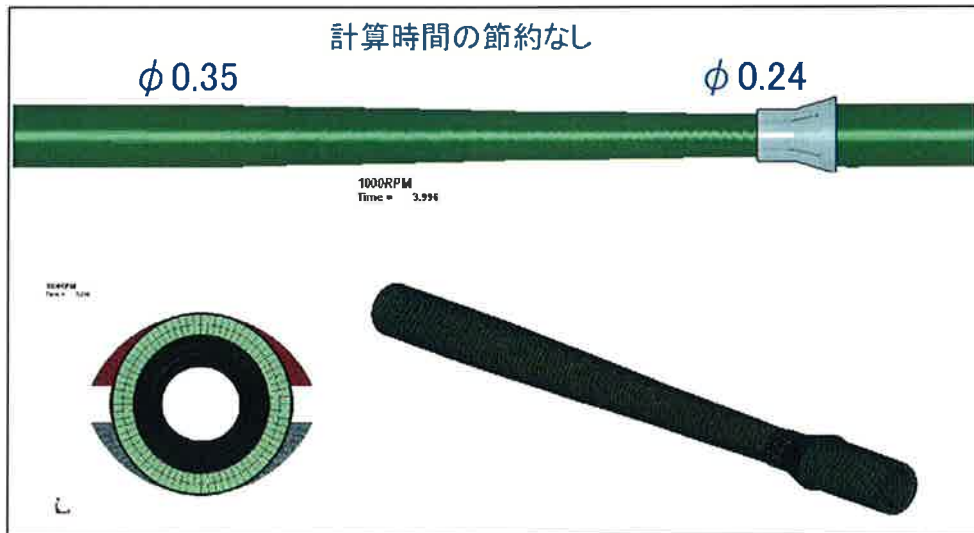


図 3-2 回転速度の設計に手を加えないで計算した結果

【ダイス形状の影響について（概要）】

産業技術総合研究所のほうで平成 20 年度に使用したタイプ C の金型は、金型材料の強度が不十分であったために金型が磨り減ってしまった。そこで、平成 21 年度には材料を変えたり、適宜コーティングを施したり、また、寸法を変えたりして、新しい金型がいくつか作製された。種々のダイス形状の場合についてシミュレーションで検討を行ったが、シミュレーション結果を細め加工後のパイプ材の内面側から外面側にかけてのひずみ分布（相当ひずみ分布）の傾向で整理すると、大きく 2 つの場合に分かれることが分かった。一つは、パイプ材の内面側に比べて外面側のひずみが大きい場合であり、あと一つは、逆の傾向（内面側に比べて外面側のひずみが小さい結果となる傾向）である。内面側に比べて外面側のひずみが小さい結果となる傾向については、図 3-3 に示すようにタイプ A の場合のひずみ分布の傾向と同じである。タイプ A の場合とタイプ C の場合との違いという観点でひずみ分布を見ると、タイプ C の場合のほうがひずみの大きさが大きい傾向にある。図 3-3（タイプ A）では、外径が 0.18mm まで縮径されており、ひずみの最大値は 1.4 である。一方、タイプ C での結果では、外径が 0.24mm までしか縮径されていないにもかかわらず、ひずみの最大値は 1.8 を越えている。

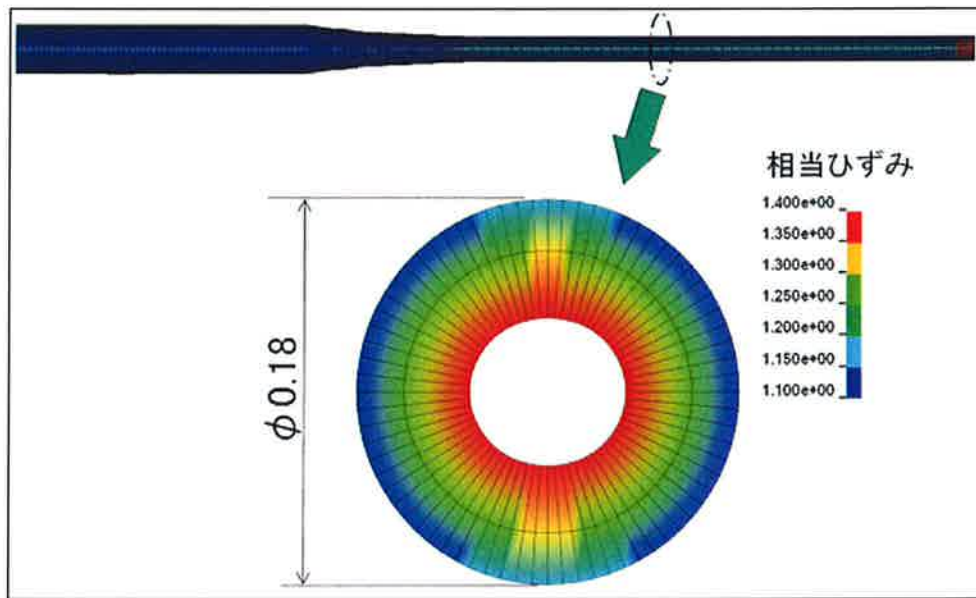


図 3-3 タイプAの場合のひずみ分布の例

【ダイス半角の影響について】

平成 21 年度に共伸で作製したダイスのシミュレーションモデルについては、他のダイスの場合に比べて比較的容易に計算結果を得ることができており、また、実際の加工実験でも比較的良好的な加工が行えたこともあり、ダイス半角を小さくしたモデルも作成して検討を行った。ダイス半角が小さい方がひずみは小さい結果が得られた。実際の加工実験で使用されているダイスのダイス半角は、シミュレーションの結果からすると、ダイス半角を小さくしたほうが良い結果となることが推測された。図 3-4 は、それぞれのダイス半角の場合でいちばん細く加工できた箇所を断面を示したものである。同じ外径 (0.24mm) の位置での結果であるが、ここで、このときの内径の大きさについては昨年度までの検討結果 (タイプAの検討結果) からすると矛盾する結果となっている。タイプAでは、同じ外径まで管細め加工した場合、加工後のパイプ材の長さが長い場合のほうが内径は大きい傾向にあった。ダイス半角が 25° の場合のほうが内径は大きいはずであると考えられるが、図 3-4 では逆の結果となっている。これは、タイプCの場合には、加工後の細め形状がタイプAの場合とは異なる (タイプCではテーパ状であるが、タイプAではストレートである) ことによるものであり、いずれの加工法であっても塑性加工前後の素材の体積が一定であることに変わりはない。タイプCのように、加工後の形状がテーパ状の場合、加工後の外径やパイプ材の全長から内径を推定することは必ずしもできないので注意する必要がある。断面の相当ひずみ分布について見ると、外面側よりも内面側のひずみが小さい。また、ダイス半角が大きい場合のほうが大きい。ひずみの内外面