

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高シリコンステンレス鋼の圧延と鍛造の複合加工による超微細粒鋼の創成  
とその製品開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 財団法人産業科学研究所

## 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
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

### 第2章 本論

- 2-1 結晶粒超微細化
  - 2-1-1 結晶粒微細化手段の検討
  - 2-1-2 設備開発
  - 2-1-3 超微細化条件の検討
- 2-2 皿ばねの高性能化
  - 2-2-1 皿ばね加工、熱処理条件の最適化
  - 2-2-2 皿ばねの特性検証
- 2-3 高性能化の原因解明
  - 2-3-1 機械的特性試験および組織観察
  - 2-3-2 データ解析

### 第3章 全体総括

- 3-1 研究開発成果
- 3-2 研究開発後の課題・事業化展開

#### 【参考文献】

# 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

### 「研究背景」

#### <川下製造業者等の抱える課題およびニーズ>

自動車を始めとする機械製品の製造に使用されるマシニングセンター等の工作機械においては、小形化、高速化、メンテナンス頻度の低減、長寿命化が強く要望されている。これらの要望を実現するためにはスピンドルユニットに使用する皿ばねの強度不足、腐食、疲労破壊の改善が必要である。マシニングセンター等に使用される皿ばねは、加工時の発熱を水で冷却するため結露環境にあり、高い耐食性と高強度・高靱性の両立が必要である。

#### <研究開発の背景>

こうした課題を解決するため、従来は皿ばねの機械加工による精度向上や、ショットピーニングによる疲労強度の向上が試みられているが、不十分な状況である。

皿ばねのさらなる高性能化のためには、高い応力振幅にも耐える高強度の材料が必要である。即ち、現在使用されている”ばね鋼SUP10” (JIS G 4801 引張強さ 1226MPa 以上) よりも高い強度の材料が必要である。鋼の高強度と高靱性化の研究は、国家プロジェクトとして進められてきたが、何れも普通鋼の圧延によるものである。結晶粒径の微細化が一つの方向であるが、ばね鋼 SUP10 の板材の結晶粒径は 10~20 $\mu\text{m}$  であり、超微細粒化 (1 $\mu\text{m}$  以下) の領域まで可能であるかは解っていなかった。

一方、結露環境で使用されるので錆びにくいステンレス鋼が望まれ、高強度のものとしては、”シリコロイ” というシリコン Si3.5%を含有する高シリコンステンレス鋼がある。しかしながら、時効硬化処理後の引張強さは 1600MPa の強さを有するが、伸びが 3.5%と小さく、ばねとしては使用出来ない材料であった。また、ステンレス鋼素材では Cr を均一に分布させるための溶体化処理を行なうため、結晶粒径の微細化は困難であると考えられていた。

こうした状況ではあったが、各種金属の自由鍛造技術における長年の経験から、耐食性に優れたステンレス鋼においても結晶粒を超微細化することが可能であると考え、高シリコンステンレス鋼において結晶粒の超微細化によって高強度・高靱性化することに挑戦し、研究開発に取り組んできた。

#### <テーマに関連・類似する最新の技術水準とトレンド、国内外の研究開発動向>

高強度鋼の研究開発は絶えず進められている。弁ばね用鋼は非常に高強度なものが作られているが、皿ばねに用いられるフープ材は量が少ないので作られていないのが現状である。またステンレス鋼については、日新製鋼において高強度なものが研究されているが、高強度になるに伴いその伸びが 2~3%と小さくなる。そこでは Si, Ti の複合添加材の析出物 Ni<sub>16</sub>, Ti<sub>6</sub>, Si, G 相は粒界に析出しにくいいため靱性を高めている、など優れた論文がある。さらに“温間溝ロール圧延によるオーステナイト系ステンレス棒鋼の特性”という微細化法による研究が(独)物質・材料研究機構によってなされている。それぞれは、成分調整によって高強度を狙いまた、圧延という手法の中で温間溝ロールによって微細化を図っている。

ドイツではマシニングセンター用ばねとして皿ばね形状の板をコイル状にした、らせん皿ば

ねを発明し市場に出している。疲労寿命に強いものであるが、その連続したコイル故に圧縮すると内径が大きくなり振動の原因となるため高速回転用には不向きと言われている。

<これまでの取り組み>

高シリコンステンレス鋼において結晶粒  $50\sim 100\mu\text{m}$  の太い丸棒を自由鍛造によって細くしながら加熱温度の制御と鍛造方法を工夫する時  $5\sim 10\mu\text{m}$  程度まで微細化が可能であることを確認した。工程の短縮と微細化をさらに進めるため溝ロール圧延機とスクリーブプレス鍛造機を用いることが量産に適した製法であると考え、溝ロール圧延機と優れた解析装置を所有する(独)物質・材料研究機構に協力を依頼し、圧延と鍛造を組み合わせた複合加工による微細化の研究開発を進めてきた。

これまでの取り組みで溝ロール圧延では軸方向に垂直な方向に微細化し、その後のスクリーブプレス鍛造により超微細粒化できることが分かった。しかしながら、鍛造による微細化では、衝撃による破壊(割れ)が起こらない条件の確立が課題となる。さらにステンレス鋼では必須の溶体化処理による軟化

を抑える条件と、時効硬化させる熱処理条件の確立が課題であるが、目標とする超微細粒化を達成し高強度・高靱性を得るには、鍛造の温度、加圧条件、溶体化処理条件、熱処理条件を整えることによって可能であることが分かりつつある。

今回の提案研究開発は  $\text{Si}3\sim 5\%$ 、 $\text{C}0.03\%$ の析出硬化型ステンレス鋼を、圧延と鍛造の複合加工によって超微細化しようとするもので、生産に適した設備を導入し最適条件を確立することによって、従来不可能とされていたステンレス鋼による高強度・高靱性な皿ばねの製品化を実現しようとするものである。

#### 「研究目的及び目標」

従来、マシニングセンターに使用される皿ばねは、ばね鋼を用いるため耐食性に問題があり、また強度不足のため多くの枚数を必要とし、装置のコンパクト化には限界があった。本研究開発では、こうした課題を解決するため耐食性に優れた高シリコンステンレス鋼を用い、圧延と鍛造の複合加工によってその結晶粒径を超微細化し、従来のばね鋼を凌ぐ高強度・高靱性で長寿命の皿ばね製品化技術を実現し、マシニングセンター等のコンパクト化、更には長寿命化に寄与することを目的とする。

技術的な成果目標は以下の通りである。

##### ① 結晶の微細化

結晶の幅： $0.3\sim 0.8\mu\text{m}$

結晶粒径(均一組織)： $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$

##### ② 皿ばねの静的特性目標値

引張強さ  $\sigma_B=1700\text{MPa}$

引張耐力  $\sigma_Y=1650\text{MPa}$

伸び  $>8\%$

シャルピー値  $>40\text{J}/\text{cm}^2$

寿命(皿ばね  $\phi 40\times \phi 20.4\times 2.25\text{t}$  において)

応力振幅最大  $1250\text{MPa}$  最小  $850\text{MPa}$  (皿ばねの組立長さ従来比  $2/3$  相当)条件での

目標寿命： $1000$  万回

応力振幅最大 1380MPa 最小 850MPa (皿ばねの組立長さ従来比 1/2 相当) 条件での  
 目標寿命 : 400 万回

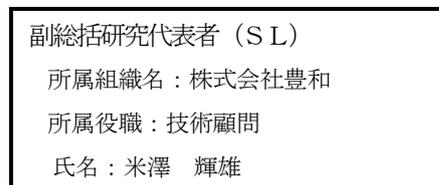
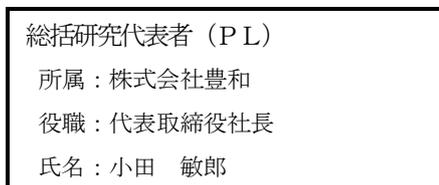
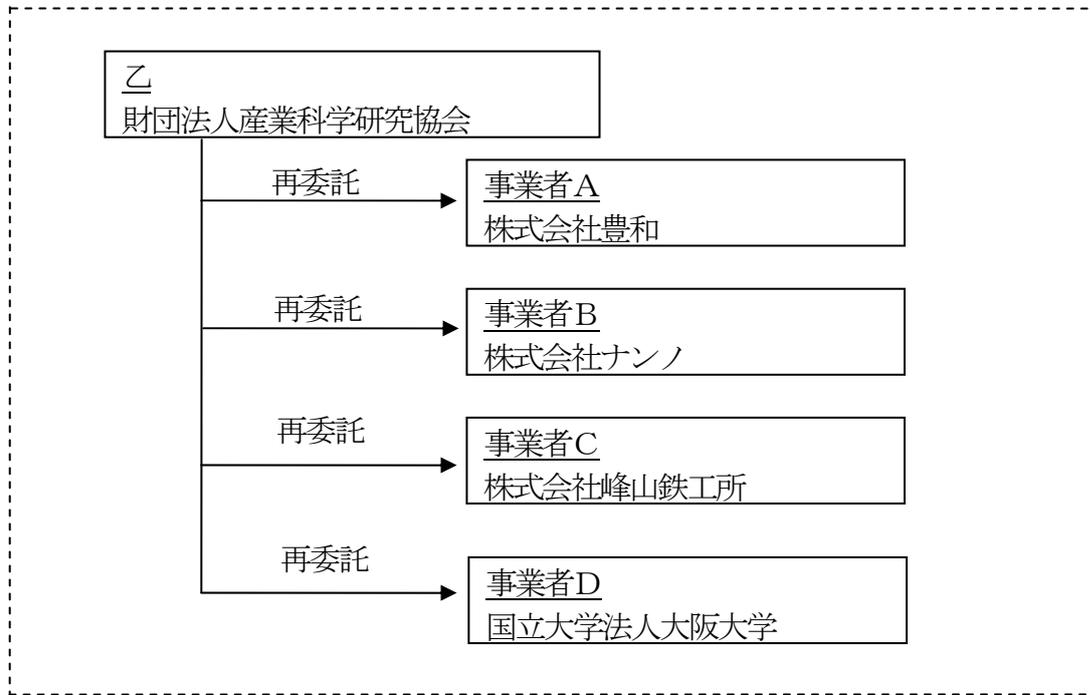
③ 高性能化の原因解明  
 特性と組織構造の関係の明確化

実施結果等を目的および目標に対して以下に示す。

	計画	実施結果等
目的	高シリコンステンレス鋼を用い、圧延と鍛造の複合加工によってその結晶粒径を超微細化し、従来のばね鋼を凌ぐ高強度・高靱性で長寿命の皿ばね製品化技術を実現し、マシニングセンター等のコンパクト化、更には長寿命化に寄与する。	新規設備を導入し、生産に適した圧延と鍛造の複合工程を確立し、従来のばね鋼の性能を凌ぐ、高強度、高靱性で長寿命の皿ばね製品化技術を実現した。マシニングセンターのコンパクト化が期待できる。
目標項目	目標値	結果
結晶の微細化		
結晶の幅	0.3~0.8 μm	~0.5 μm
結晶粒径 (均一組織)	0.2~0.5 μm	~0.5 μm
皿ばねの静的特性目標値		
引張強さ σ <sub>B</sub>	1700 MPa	1579 MPa (avr.)
引張耐力 σ <sub>Y</sub>	1650 MPa	1503 MPa (avr.)
伸び	>8%	8.7%
シャルピー値	>40 J/c m <sup>2</sup>	48.5 J/c m <sup>2</sup>
寿命特性 (皿ばね φ40×φ20.4×2.25 t において)		
目標寿命 条件1 : 応力振幅最大 1250MPa 最小 850MPa (皿ばねの組立長さ従来比 2/3 相当)	1000 万回	230 万回以上 (継続中)
目標寿命 条件2 : 応力振幅最大 1380MPa 最小 850MPa (皿ばねの組立長さ従来比 1/2 相当)	400 万回	230 万回以上 (継続中)

## 1-2 研究体制

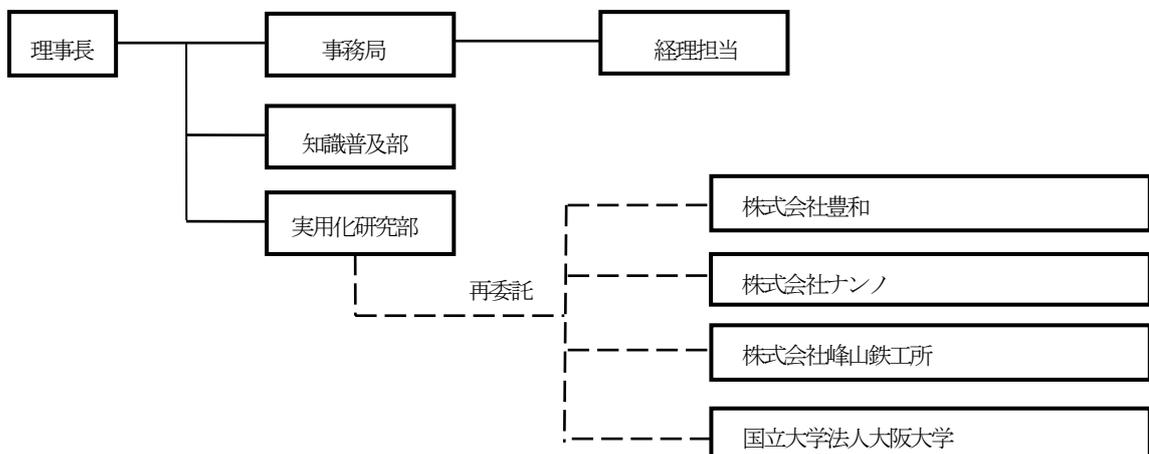
### 研究組織（全体）



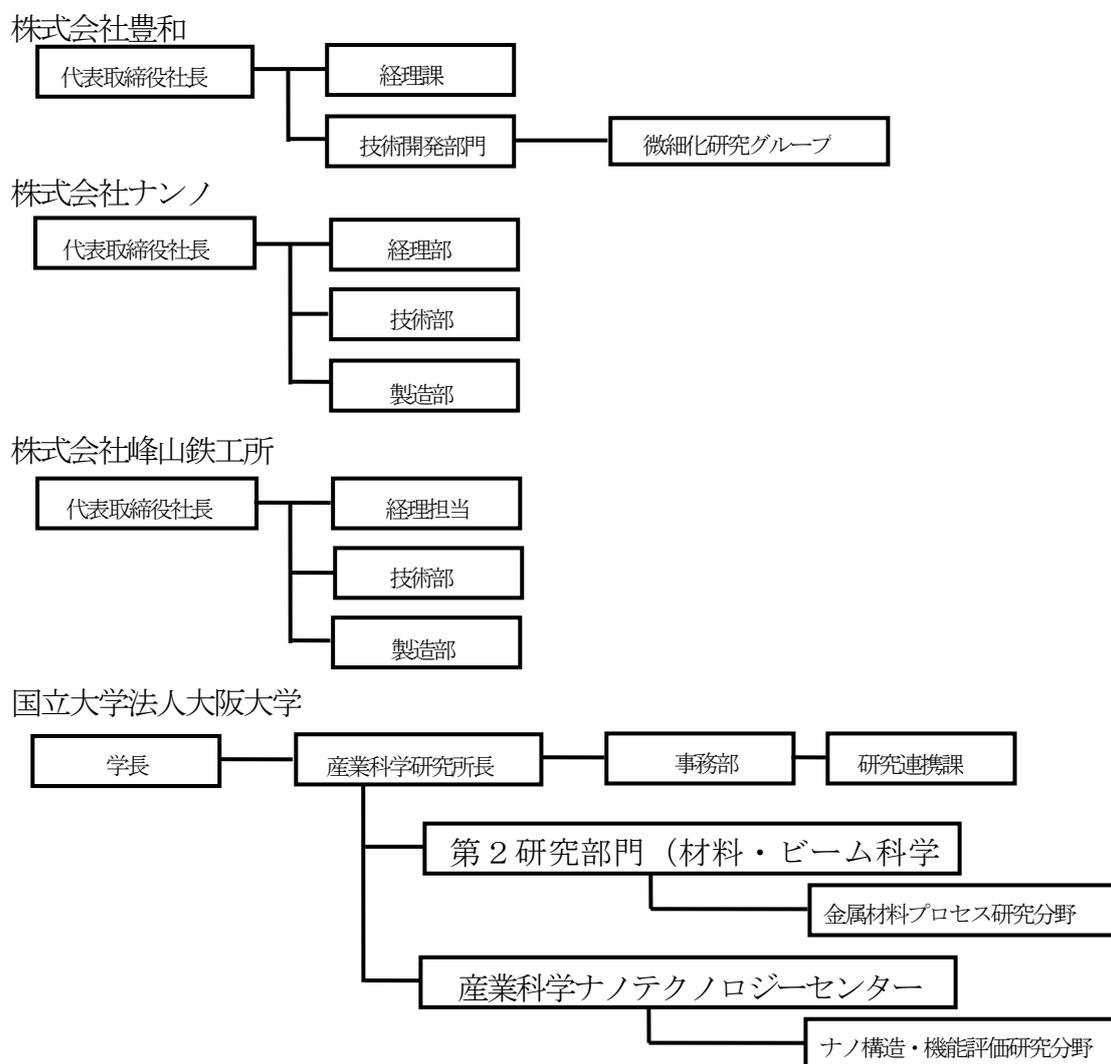
### 管理体制

#### ①事業管理者

[財団法人産業科学研究協会]



② (再委託先)



管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人 産業科学研究協会

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容
玉井 誠一郎 清水 裕一 二村 清	専務理事 理事 事務局・経理担当マネージャ	事業管理 事業管理 事業管理

【再委託先】※研究員のみ

株式会社豊和

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
小田 敏郎	代表取締役社長	①②③
米澤 輝雄	技術顧問	①②③

株式会社ナンノ

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
南野 将人	製造部・マネージャ	①②

株式会社峰山鉄工所

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
井下 浩孝	製造部・部長	①

国立大学法人大阪大学

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
中嶋 英雄	産業科学研究所・教授	③
鈴木 進補	産業科学研究所・准教授	③
石丸 学	産業科学研究所・准教授	③

経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人産業科学研究協会

(経理担当者) 事務局

二村 清

(業務管理者) 事務局 (専務理事)

玉井誠一郎

(再委託先)

株式会社豊和

(経理担当者) 経理課

小田千代子

(業務管理者) 代表取締役

小田敏郎

株式会社ナンノ

(経理担当者) 経理部

小国文孝

(業務管理者) 代表取締役

南野重雄

株式会社峰山鉄工所

(経理担当者) 取締役

南野春美

(業務管理者) 専務取締役

平田勝彦

国立大学法人大阪大学

(経理担当者) 産業科学研究所 事務部 研究連携課

柏倉重雄

(業務管理者) 産業科学研究所 事務部長

仲田 昇

その他

アドバイザー

株式会社ジェイテクト

社団法人日本鍛造協会

垣野義昭 国立大学法人京都大学 名誉教授

中嶋英雄 国立大学法人大阪大学 教授

高井健一 学校法人上智大学 教授

三宅正靱 環境技術試験代表

### 1-3 成果概要

本研究開発は高シリコンステンレス鋼（SP320）を、圧延と鍛造の複合加工によって超微細化しようとするもので、生産に適した設備を導入することによって、従来不可能とされていたステンレス鋼による高強度・高靱性な皿ばねの製品化を実現しようとするものである。

本研究開発の設備開発では、生産に適した装置を選定し、必要な仕様を決定し、導入した。設備としては、生産に必要となる設備として、ロール圧延の予備加熱用としての加熱炉、鍛造前のビレットを短時間で加熱する高周波加熱装置および製品としての特性を確認するための皿ばね特性試験機の開発を行った。ロール圧延の予備加熱炉として、生産に適した装置としては2つの炉室を持つ双室式とし、より安定した炉の状態を確保できるようにした。加熱炉において、昇温時間、炉内温度分布、扉開閉による温度変化等についても所望の条件が得られることを確認した。鍛造前のビレットを加熱する装置としては、高周波加熱方式の装置を導入することとし、高周波誘導加熱のため過熱が数秒で済み、連続的な材料の供給が可能であり、設置後の連続運転で所望のスループット時間を確認した。導入後に皿ばねを生産レベルで作製することができることが確認できた。

既に開発導入済みの3ロール式ロール圧延装置と今回導入した設備を用いて皿ばねを作製する工程を確立し、皿ばねを生産レベルで作成できることが確認できた。

特性の確認は、時間の関係で、加熱炉と高周波加熱炉については代替の設備を用いて試作を行い、導入した試験機等を用いて目標値をほぼ実現することを確認した。

高性能化の原因解明においては、試料の微細構造観察と特性試験を行ない、考察を行なった。鍛造直後では、大部分の結晶粒サイズはサブミクロン程度になっていることを確認した。時効熱処理した試料では再結晶化による回復が起こり、鍛造試料よりも結晶粒は大きくなっていることが分かる。鍛造試料では結晶粒の形状に異方性は見られないが、時効試料では圧延試料で見られる様な伸びた結晶粒が形成されている。長手方向は結晶が大きくなっているのに対し、短手方向はサブミクロンを保っている。従来の手法では熱処理に伴う結晶粒の急激な成長が問題となっていたが、本研究開発で得られた試料においては粒子の粗大化が比較的抑制されていることが明らかとなった。機械的特性試験では、時効処理温度が増加すると、耐力、引張強さの低下が見られたが、延性、破壊靱性が向上することが明らかにし、微細化と熱処理による回復の制御による高性能化の方向性を示すことができた。

### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属 財団法人産業科学研究協会  
氏名 清水裕一  
電話 06-6879-8448  
FAX 06-6879-8448  
E-mail shimizu@sanken.osaka-u.ac.jp

## 第2章 本論

### 2-1 結晶粒超微細化

#### 2-1-1. 結晶粒微細化手段の検討

耐食性に優れた高強度かつ高靱性を合わせ持つ材料を実現するため、ステンレス鋼において鍛造技術により結晶粒を微細化し、優れた特性を実現する手段について検討を行ってきた。素材としては、耐磨耗、高強度等の機械的特性のみならず耐食性をも満足させることを考え、析出硬化系のステンレス鋼に着目し、高シリコンステンレス鋼（S P 3 2 0）を選定した。高シリコンステンレス鋼は、析出硬化させることで、ばね鋼並みに硬度を得ることができるが、伸びと引張強さの両立が課題であった。そこで、大歪圧縮変形による組織の微細化を実現することで、ばね鋼並みの硬度でも伸びを持たせることができると考え、そのための手段について検討を行ってきた。

結晶粒の微細化の方法として、大歪圧縮変形を採用した。このとき重要となるのが、加熱温度と歪条件である。加熱温度が高すぎると組織は粗大になってしまい、逆に加熱温度が低すぎると歪を与える際に割れが生じてしまう。結晶粒微細化の加工プロセスとしては、

素材 → 加熱 → 鍛造 → 固溶化処理 → 時効処理

を基本プロセスとし、検討を行ってきた。皿ばねのような円盤状のものを最終形状と想定した場合の形状のイメージ図は図1のようになる。

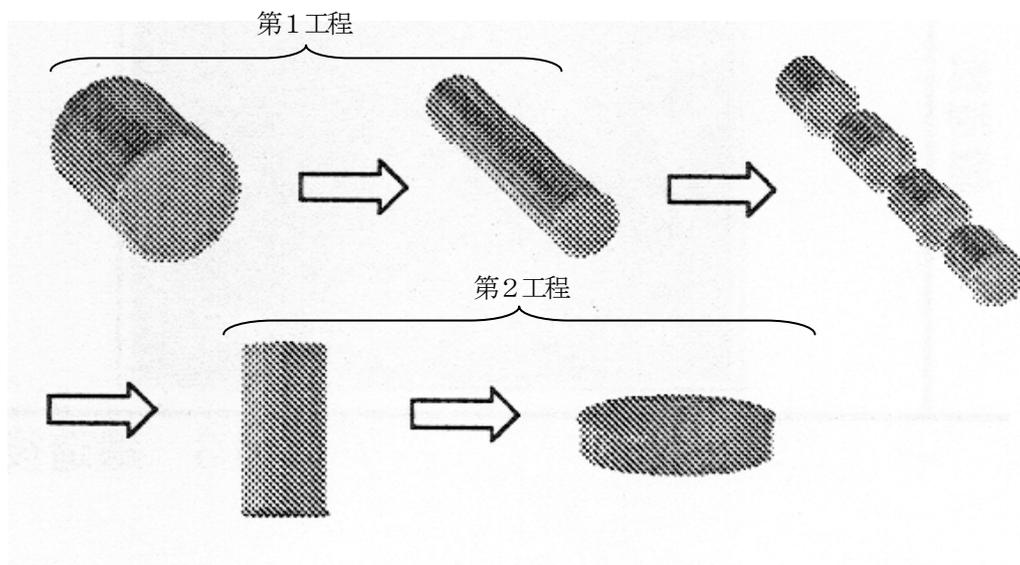


図1 加工プロセスの形状イメージ

第1工程として丸棒の径を鍛造により細くし、長手方向に伸ばす。所定の径まで細く鍛造した後、所定の長さに切断し、第2工程として長手方向に鍛造することで結晶粒微細化を完成させる。この工程はオースフォーミングとなる※。（※オーステナイトの状態を外力をか

けて成形する方法をオースフォーミングといい、加工熱処理と総称する。オースフォーミングして焼入れすると、マルテンサイトが微細になって硬く、強くなり、これをテンパすると強靱なものとなる。)

基本プロセスとして、上記の工程を想定し、フリー鍛造による実験試作で、ほぼ所望の特性を達成することができた。

しかしながら、フリー鍛造による作製では、生産性が低いため、量産に適した工程とするための手段を模索した結果、第1工程としてロール圧延による細径化、第2工程としてスクリュープレス鍛造を選定し、独立行政法人物質・材料研究機構にあるロール圧延の実験機を借用し、試作を繰り返し、所望の特性を再現できることを確認してきた。ロール圧延が有効な加工装置であることが判明したが、生産のためにはロール圧延を何回も行なう必要があることが分かった。実験機では、2ロール式で1回に1方向の圧延しかできないため、何回もロール圧延機を通すことによって所望の形状にまで加工を行った。その後、スクリュープレスによる鍛造を行った。

予備実験の工程としては、表1に示すように、(素材)→加熱→鍛造→切断→加熱→ロール圧延→加熱→型鍛造→固溶化処理→時効処理からなるプロセス手段を確立し、所望の特性を実現するプロセス条件の確立を行ってきた。

工程番号	工程	装置
1	加熱	電気炉
2	鍛造	エアハンマー
3	切断	バンドソー
4	加熱	バッチ炉 (実験機)
5	ロール圧延	ロール圧延機 (2ロール)
6	加熱	丸型重油炉 (実験機)
7	鍛造	スクリュープレス
8	固溶化処理	ソルトバス
9	機械加工	旋盤
10	時効処理	ソルトバス

表1 予備実験の工程

この予備実験のロール圧延機は、前述のように生産性が低い。そこで、生産性を高め、かつ圧延加工による温度低下を防ぐことを目的に、新たに3ロール式の圧延装置を設計し、生産性と性能向上を図ることが可能な装置として導入し、従来の第1工程における鍛造に相当する手段として置き換えを行なった(表1では工程5)。本研究開発においては、次節で述べる新たな設備を含め、生産に適した工程手段としての確認を行うことにした。

## 2-1-2. 設備開発

### 【実施計画】

本研究開発で必要となるロール圧延の予備加熱用電気炉、鍛造前のビレットを加熱する高周波加熱装置および皿ばね特性試験機の開発を行う。

ロール圧延の予備加熱用電気炉については、生産に適した仕様を決定し、設置後所望の条件が実現できることを確認する。

鍛造前のビレットを加熱する高周波加熱装置については、結晶粒の粗大化を起こさないよ

うに加熱するための仕様を決定し、設置後基本性能の確認を行なう。

皿ばね単体および組み合わせ製品の機械的特性を測定することを目的とした皿ばね特性試験機については、自動ばね試験機および試験機用ソフトを選定し、皿ばねの測定ものとなるよう調整を行う。

#### 【実施内容・成果】

本研究開発の設備開発で行なったことは、生産に適した装置を選定し、必要な仕様を決定し、導入後の確認である。該当する設備としては、(既開発済みの3ロール式ロール圧延機、スクリーンプレス機に加え、) 生産に必要となる設備として、前述の工程4で使用するロール圧延の予備加熱用として実験機のバッチ炉を置き換える加熱炉、工程6で使用する鍛造前のビレットを加熱する丸型重油炉を置き換える高周波加熱装置および製品としての特性を確認するための皿ばね特性試験機の開発を行った。

ロール圧延の予備加熱炉として、実験機としてはバッチ炉(電気炉)を使用したが、この装置では炉室が1つしかないため、多数の棒状の材料を過熱し連続的に取り出しロール圧延機に供給する間に炉の温度が低下し、安定した温度条件を提供することが困難であった。

また、扉の開閉が手動式のため、作業性が悪く、老朽化しているため安全性、安定性に不安があった。このため、生産に適した装置としては2つの炉室を持つ双室式とし、2つの炉を同時に使用することにより、より安定した炉の状態を確保できるようにした。また、タイマーによる加熱制御、フットスイッチによる扉開閉、炉床に丸棒を固定するSiC板材を使用するなど生産に適した仕様を決定した。導入した双室式加熱炉を図2に示す。



図2 加熱炉

導入した加熱炉において、昇温時間、炉内温度分布、扉開閉による温度変化等についても所望の条件が得られることを確認した。

次に、鍛造前のビレットを加熱する装置としては、実験用として丸型重油炉を使用したが、加熱および取り出しに時間がかかり結晶粒の微細化にとっては、良い条件を得ることが困難で、かつ生産性の高い作業を行なうことができない装置であった。このため、本研究開発では高周波加熱方式の装置を導入することとし、仕様の決定を行なった。

従来の重油炉では、鍛造前の約800℃の加熱処理に約20分程度の時間がかかり、結晶粒

の再結晶化が進み、微細化が不十分である可能性があった。今回導入した高周波加熱装置は、図3に示すように左側から材料を連続的に供給し、加熱炉部で過熱し、右側に送られ、取り出し鍛造工程に供給することになり、高周波誘導加熱のため過熱が数秒で済み、連続的な材料の供給が可能であり、設置後の連続運転で約1分のスループット時間を確認した。



図3 高周波加熱装置

皿ばね単体および組み合わせ製品の機械的特性を測定することを目的とした皿ばね特性試験機については、今回開発する皿ばねおよび今後コイルばね等にも展開できる試験機とするため、圧縮及び引っ張り試験の可能で、最大50kNの加重が可能な高荷重自動ばね試験機とした。また、試験機用ソフトとしては、皿ばね特性試験に使い、統計処理等を含むソフトを選定し、グラフチャートの表示も可能とした。導入した装置を図4に示す。この試験機にて皿ばね特性の測定ができるよう調整を行ない所望の目的に合致した測定が可能であることを確認した。



図4 皿ばね試験装置

### 2-1-3. 超微細化条件の検討

#### 【実施計画】

高シリコンステンレス鋼の結晶粒の超微細化はロール圧延とスクリュープレス鍛造の組み合わせ加工によって行なう。今回導入予定の加熱炉、高周波加熱装置によって、これまでに行なってきた予備実験によって得た結果を基に超微細化のための最適条件の確認を行なう。

#### 【実施内容・成果】

本研究開発においては、従来実験を行ってきた装置に加えて、ロール圧延前の新規導入の加熱炉、3ロール式ロール圧延機、およびスクリュープレス鍛造前の新規導入の高周波加熱装置を用いて、微細化の確認を行う予定であったが、実施期間の関係で、装置の製作納入後の時間が十分に取れなかったため、以下の表2に示すように2段階の実験とし、実験試作1では、ロール圧延前の加熱には従来のバッチ炉、スクリュープレス鍛造前の加熱には従来の丸型重油炉を使用、実験試作2で、それぞれの工程に新規の加熱炉および高周波加熱装置を使用し最終工程としての確認を行うこととした。

工程	実験試作1		実験試作2	
	装置	条件	装置	条件
加熱	電気炉		同左	
鍛造	エアハンマー		同左	
切断	バンドソー		同左	
加熱	バッチ炉 (実験機)		加熱炉 (新規)	
ロール圧延	ロール圧延機 (3ロール)		同左	
加熱	丸型重油炉 (実験機)		高周波加熱装置 (新規)	
鍛造	スクリュープレス		同左	
固溶化処理	ソルトバス		同左	
機械加工	旋盤			
時効処理	ソルトバス	①条件1 ②条件2	同左	
評価	機械的特性 断面観察 皿ばね特性 寿命試験		補完研究にて実施予定	

表2 実験試作の工程と条件

今回の成果として、新規のロール圧延機による実験試作1において作製した材料において、後述の断面観察結果に示すように、従来の実験で確認した結晶粒の微細化を再現することができた。また、新規に導入した加熱炉、高周波加熱装置を用いて実験試作2を行い、皿ばねを作製した。今後、詳細な評価を行う予定である。鍛造前の加熱時間の短縮による更なる微細化、特性の向上が期待できる。

## 2-2 皿ばねの高性能化

### 2-2-1. 皿ばね加工、熱処理条件の最適化

#### 【実施計画】

圧延と鍛造の組み合わせ加工により結晶粒を超微細化した母材を高性能皿ばねとするため、機械加工による形状形成（皿ばね加工）と合金元素の固溶化熱処理、時効処理を行なう。

皿ばね加工では、撓んでも内径の変化しない形状と疲労寿命の点からきれいな仕上げ面となる加工法を確立する。

溶体化処理（固溶化熱処理）では、結晶粒が粗大化せず、固溶化（溶体化）が十分に行なわれる条件を確認する。

さらに、析出硬化による高強度と靱性が、皿ばね寿命にとっても最適となる時効処理条件を確認する。

#### 【実施内容・成果】

鍛造加工を終えた後、析出した合金元素を再度溶け込ませる固溶化処理、皿ばね形状にするための切削機械加工、および析出硬化を促進する時効処理についての検討を行なった。固溶化処理については、表3の処理条件がほぼ安定な条件であることが分かっているので、今回はこの条件については固定条件とした。

工程	条件
固溶化処理	ソルトバス 約 1000℃

表3 固溶化処理条件

時効処理については、温度によって特性に大きく影響することがわかっており、本研究開発では表4に示す最適と考えられる範囲で2条件についての検討を行なった。

工程	条件
時効処理	条件1 ソルトバス
	条件2 ソルトバス

表4 時効処理条件

これらの2条件については、作製した試料の機械的特性試験を行なうとともに、最適と推定している条件1については組織観察を行なった。（2-3項参照）

皿ばね加工については、従来の試作では、鍛造、固溶化処理後の円盤状部材を切削加工により形状を出していたが、本研究開発では鍛造時に金型を使用する型鍛造によりできるだけ最終形状に近い形状にするニアネットシェイプ加工を行なった。

これらの金型を用いて鍛造を行い、鍛造後の機械加工（旋盤）による切削加工量を低減できることを確認した。鍛造後、固溶化処理、機械加工、時効処理を行なった後、ショットピーニング処理を行い完成した皿ばねを図5に示す。



## 試験結果グラフ

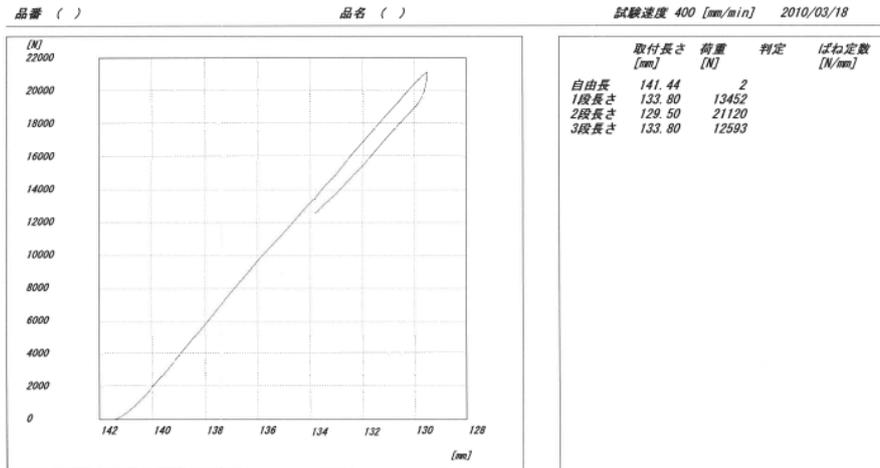


図 7 予備実験で作製した皿ばねの荷重－撓み特性

この結果を比較すると、ほぼ同様の曲線を描いており、静的特性として同様の皿ばねが作製できたことを確認した。さらに、このデータを基に所定の荷重に対する皿ばね 1 枚当たりの撓み量を求め、マシニングセンターに使用する皿ばねの枚数の算出等を行なった。マシニングセンターでは皿ばねを多数枚重ね、図 8 に示すようなスピンドルユニットに組み上げる。



図 8 皿ばねを組み込んだスピンドルユニット

詳細な計算は、ここでは省略するが、標準スピンドルユニットで従来のばね鋼 SUP10 を用いた皿ばねでは 36 枚を使用しているが、今回の開発で得られる皿ばねで同等の応力を得るのに必要な枚数は約  $2/3 \sim 1/2$  で良いことを確認した。寿命試験は、これらの結果を踏まえて、当初の計画通り、皿ばねの組み立て長さを従来比  $2/3$  および  $1/2$  の条件で、実際に使用される状況と同様の寿命試験装置を用いて行なった。

今回行なった寿命試験の状況を以下の表 5 に示す。

試験条件	目標	2010. 3. 30 時点
応力振幅最大 1250MPa 最小 850MPa (皿ばねの組立長さ従来比 $2/3$ 相当)	1000 万回	230 万回
応力振幅最大 1380MPa 最小 850MPa (皿ばねの組立長さ従来比 $1/2$ 相当)	400 万回	230 万回

表 5 寿命試験条件と途中結果

目標に到達するのは、それぞれの条件で 6 月上旬、4 月中旬の予定である。従来の皿ばねでは、JIS 推定寿命が 25 万回であるので、現時点で既に非常に長寿命であることを確認した。

## 2-3 高性能化の原因解明

### 2-3-1. 機械的特性試験および組織観察（株式会社豊和、大阪大学）

#### 【実施計画】

処理条件の異なるテスト材の機械的特性試験と電子顕微鏡、透過電子顕微鏡による組織観察を行う。テスト材の加工および機械的特性試験については外注にて行なう。

#### 【実施内容・成果】

今回の機械的特性試験および組織観察に使用した試料は、表 2 に示した実験試作 1 の工程を用い、表 4 に示す時効処理条件 1, 2 で試作したものである。これらの試料について、機械的特性および種々の特性を調べるための基本的な予備調査を実施した上で、テストサンプルの作製および機械的特性測定を行った。

試験片作製は、引張試験片母材 6 片より中央部より各 1 個、合計 6 個抽出した。JIS Z 2201 に規定される 13 号日試験片について 1/2 サイズに加工し標点距離 25mm、平行部幅 6.25mm、平行部長さ約 30mm で加工した。板厚は面削により 2.00mm とした。衝撃試験片母材 6 片より中央部を除く端側より各 1 個、合計 6 個抽出する]IS Z 2242 に規定される試験片について長さ E<sub>j</sub>5mm、高さ 10mm、幅 5mm の 1/2 サイズに加工しノッチは深さ 2mm の U ノッチ試験片とした。測定結果は表 6 に示すとおりである。

	単位	時効処理条件 1	時効処理条件 2
耐力	N/mm <sup>2</sup>	1488-1514	1411-1418
引張強さ	N/mm <sup>2</sup>	1572-1588	1483-1490
伸び	%	8.2-9.2	11.6-12.2
吸収エネルギー	J	18.0-20.6	24.0-28.3
衝撃値	J/cm <sup>2</sup>	45.0-51.6	60.0-70.8

表 6 機械的特性試験結果

組織観察については、表 7 に示すサンプルについて行った。

工程	装置	ロール圧延後	鍛造後	時効処理後
加熱	電気炉	実施	実施	実施
鍛造	エアーハンマー	実施	実施	実施
切断	バンドソー	実施	実施	実施
加熱	バッチ炉 (実験機)	実施	実施	実施

ロール圧延	ロール圧延機 (3ロール)	実施	実施	実施
加熱	丸型重油炉 (実験機)		実施	実施
鍛造	スクリュープレス		実施	実施
固溶化処理	ソルトバス			実施
機械加工	旋盤			実施
時効処理	ソルトバス			実施

表7 組織観察サンプルの実施工程

本プロジェクトで開発された鍛造直後の試料（鍛造試料）、およびそれに時効を施した試料（時効試料）の微細構造を顕微鏡で調査した。ロール圧延後の微細構造観察は光学顕微鏡を、鍛造後および時効処理後の微細構造観察は透過電子顕微鏡を用いて行なった。透過電子顕微鏡による観察は以下に示す実験方法により実施した。

（実験方法）

試料をロースピードホイールソーで短冊状に切り、トライポッドポリリッシャーを用いて  $10\mu\text{m}$  以下まで薄片化後、Ar イオンミリングにより透過電子顕微鏡試料に加工した。なお、イオンミリングによる損傷を抑えるため、Ar イオンのエネルギーは  $4\text{keV}$  から徐々に下げ、最終的には  $2.5\text{keV}$  とした。また、試料作製時の温度上昇を避けるため、液体窒素温度にてイオンミリングを行った。試料の評価には大阪大学産業科学研究所に設置してある日本電子製透過電子顕微鏡 JEM-3000F を用い、加速電圧  $300\text{kV}$  で組織観察を行った。

（実験結果）

図8 (a)は、鍛造試料の透過電子顕微鏡写真である。広範囲の領域を示すため、観察視野をずらし組み写真にしている。結晶方位の違いによる回折コントラストが見られ、多結晶になっていることが分かる。大部分の結晶粒サイズはサブミクロン程度になっている。ただし、少数ではあるが数マイクロメートル程度の結晶粒が存在することが確認された（図8 (b)）。圧延材においては、圧延方向に沿って結晶粒が伸びることが知られているが、今回得られた鍛造試料では結晶粒の優先的な伸びは見られなかった。

図8の試料を条件1で熱処理した時効試料の透過電子顕微鏡像を、図9に示す。試料の切り出し方向は鍛造試料と一致させている。再結晶化による回復が起こり、鍛造試料よりも結晶粒は大きくなっていることが分かる。鍛造試料（図15）では結晶粒の形状に異方性は見られないが、時効試料では圧延試料で見られる様な伸びた結晶粒が形成されている。長手方向は  $2\sim 3\mu\text{m}$  であるのに対し、短手方向はサブミクロンを保っている。従来手法では熱処理に伴う結晶粒の急激な成長が問題となっていたが、本プロジェクトで得られた試料においては粒子の粗大化が比較的抑制されていることが明らかとなった。

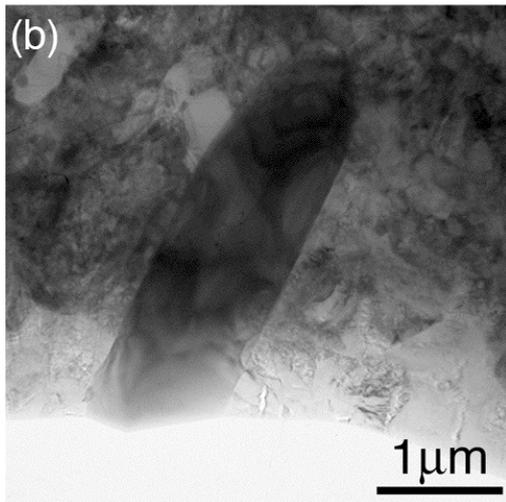
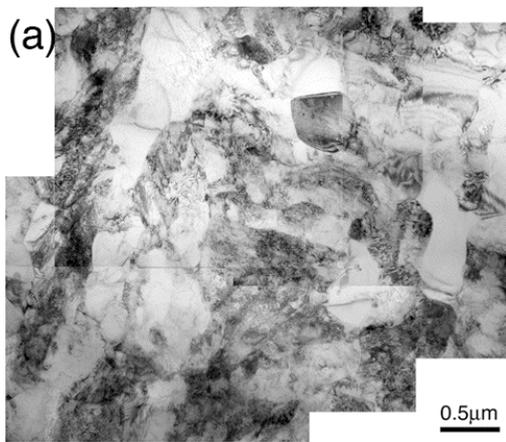


図8 鍛造試料の透過電子顕微鏡像

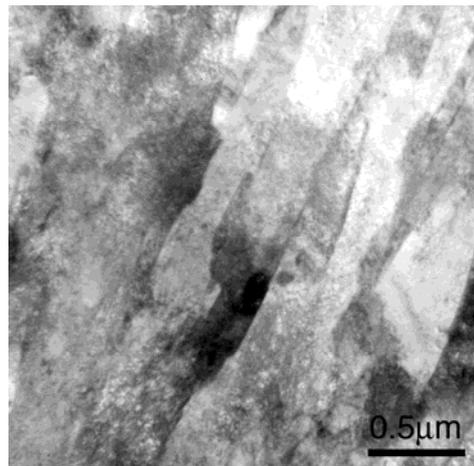


図9 時効試料の透過電子顕微鏡像

鍛造試料では目的とするサブミクロンの結晶粒が得られていた。一方、時効試料では再結晶化による結晶粒の成長が起こっているが、従来報告されている超微細粒に較べると組織の粗大化が抑制されていることが確認できた。

### 2-3-2. データ解析

#### 【実施計画】

皿ばねの特性試験結果およびテスト材の特性試験、組織観察結果をもとに、結晶構造と特性の関係についての考察を行なう。

#### 【実施内容・成果】

時効処理温度・時間の条件1および条件2で熱処理した時効試料から試験片を切り出し、引張試験をおよびシャルピー衝撃試験を実施した。いずれの特性評価においても、同条件で作製した試料について3回試験を行った。引張試験片サイズは6.3(幅) x 2.0(厚さ) x 25.0(ゲージ長さ) mm<sup>3</sup>とした。

図10に時効処理温度・時間条件1および条件2で熱処理した時効試料の0.2%耐力および引張強さを示す。時効処理温度が増加すると、耐力、引張強さの低下が見られたが、図11の伸びの値が示すように、延性が向上した。同時に、図12のシャルピー衝撃試験結果から、破壊靱性も改善されていることが明らかになった。それぞれの図で、プロットは3回の測定の平均値、誤差

棒は最大および最小値を示す。

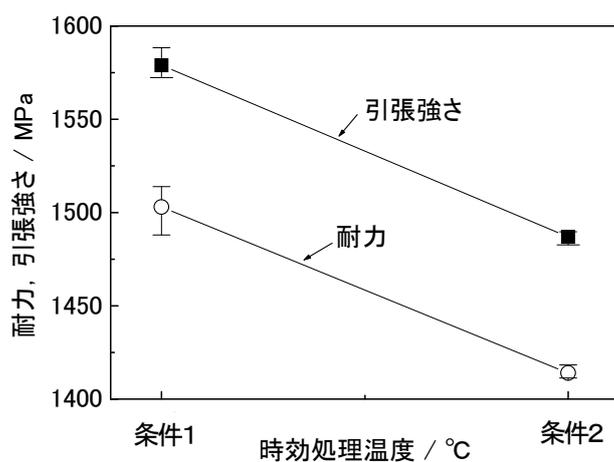


図10. 時効試料の0.2%耐力および引張強さ

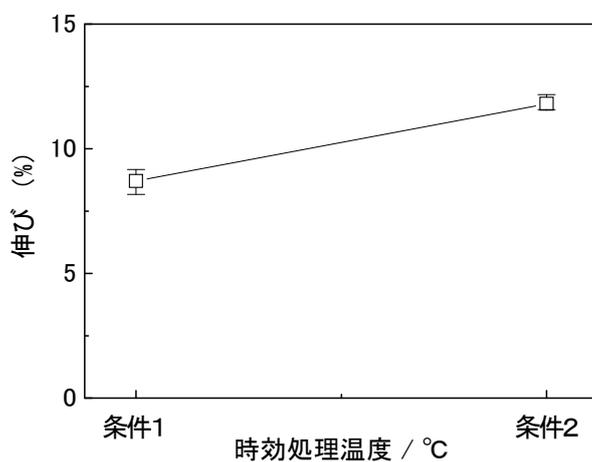


図11. 時効試料の伸び

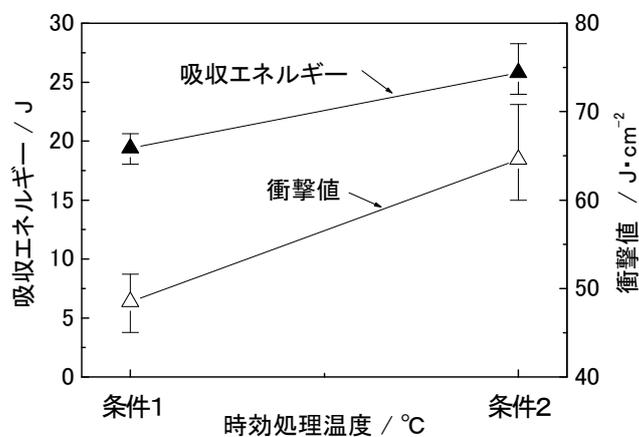


図12. 時効試料の吸収エネルギーおよび衝撃値

最後に、本研究開発における試作実験で明らかになった特性を目標値との対比で表 1 5 に示す。

項目	単位	目標	本研究開発結果
結晶の微細化			
結晶の幅	$\mu\text{m}$	0.3~0.8	~0.5
結晶粒径 (均一組織)	$\mu\text{m}$	0.2~0.5	~0.5
皿ばねの静的特性目標値			
引張強さ $\sigma_B$	MPa	1700	1579 (avr.)
引張耐力 $\sigma_Y$	MPa	1650	1503 (avr.)
伸び		>8%	8.7%
シャルピー値	J/c m <sup>2</sup>	>40	48.5
寿命特性 (皿ばね $\phi 40 \times \phi 20.4 \times 2.25\text{ t}$ において)			
目標寿命 条件 1 : 応力振幅最大 1250MPa 最小 850MPa (皿ばねの組立長さ従来比 2/3 相当)	回	1000 万	230 万回以上 (継続中)
目標寿命 条件 2 : 応力振幅最大 1380MPa 最小 850MPa (皿ばねの組立長さ従来比 1/2 相当)	回	400 万	230 万回以上 (継続中)

表 1 5 . 試験結果のまとめ

この表からわかるように、高シリコンステンレス鋼の圧延と鍛造の複合加工を用いて結晶粒を微細化し、高強度、長寿命の皿ばねを生産できるレベルの工程を確立すべく、必要な装置を導入し、目標値をほぼ実現することを確認した。引張強さおよび引張耐力については、やや低い値であったが、今回の試作では、予定した加熱炉、高周波加熱炉を用いた試作品ではなく、代替の装置による試作であるため、今後予定した装置を用いて、より微細化が可能であると考えられるため、目標値を上回る特性が期待できる。寿命特性についても、現在継続中であるが、同様の条件での実験試作品で寿命試験を行ない、条件 1 で 1500 万回以上を達成しており、再現することが期待できる。

## 第3章 全体総括

### 3-1 研究開発成果

本研究開発は Si3~5%、C0.03%の析出硬化型ステンレス鋼（SP320）を、圧延と鍛造の複合加工によって超微細化しようとするもので、生産に適した設備を導入し最適条件を確立することによって、従来不可能とされていたステンレス鋼による高強度・高靱性な皿ばねの製品化を実現しようとするものである。

本研究開発の設備開発では、生産に適した装置を選定し、必要な仕様を決定し、導入後の皿ばね作製の確認を行なった。設備としては、生産に必要となる設備として、ロール圧延の予備加熱用としての加熱炉、鍛造前のビレットを短時間で加熱する高周波加熱装置および製品としての特性を確認するための皿ばね特性試験機の開発を行った。

ロール圧延の予備加熱炉として、生産に適した装置としては2つの炉室を持つ双室式とし、より安定した炉の状態を確保できるようにした。加熱炉において、昇温時間、炉内温度分布、扉開閉による温度変化等についても所望の条件が得られることを確認した。

鍛造前のビレットを加熱する装置としては、高周波加熱方式の装置を導入することとし、高周波誘導加熱のため過熱が数秒で済み、連続的な材料の供給が可能であり、設置後の連続運転で所望のスループット時間を確認した。

既に開発導入済みの3ロール式ロール圧延装置と今回導入した設備を用いて皿ばねを作製する工程を確立し、生産性の高い皿ばねの試作を行なうことができることを確認した。特性の確認は、時間の関係で、加熱炉と高周波加熱炉については代替の設備を用いて試作を行い、導入した試験機等を用いて目標値をほぼ実現することを確認した。今後、予定した装置を用いて、より微細化が可能であると考えられるため、目標値を上回る特性が期待できる。

高性能化の原因解明においては、試料の微細構造観察と特性試験を行ない、考察を行なった。鍛造直後では、大部分の結晶粒サイズはサブミクロン程度になっていることを確認した。時効熱処理した試料では再結晶化による回復が起こり、鍛造試料よりも結晶粒は大きくなっていることが分かる。鍛造試料では結晶粒の形状に異方性は見られないが、時効試料では圧延試料で見られる様な伸びた結晶粒が形成されている。長手方向は結晶が大きくなっているのに対し、短手方向はサブミクロンを保っている。従来の手法では熱処理に伴う結晶粒の急激な成長が問題となっていたが、本研究開発で得られた試料においては粒子の粗大化が比較的抑制されていることが明らかとなった。機械的特性試験では、時効処理温度が増加すると、耐力、引張強さの低下が見られたが、延性、破壊靱性が向上することが明らかになり、微細化と熱処理による回復の制御による高性能化の方向性を示すことができた。

### 3-2 研究開発後の課題・事業化展開

今回は、短期間での研究開発となったため、当初予定した設備を使用して皿ばねを作製したものの特性の確認を行なうことができなかった。新規に導入した設備により、皿ばねを作製するところまでは、確認済みのため、今後の課題として、以下のことが考えられる。

- 1) 新規導入設備を用いて作製したものについて、特性試験を行ない、より高性能化されていることを確認する。
- 2) 高周波加熱装置については、結晶粒の粗大化を抑制することが期待されるため、最適条件の確立を行なう。
- 3) 時効処理による特性変化が認められるため、これについても最適条件の確立を行なう。
- 4) 型鍛造については、切削加工を最小限にするべく、型の修正を行なう。
- 5) 寿命試験については継続すると共に、新規導入設備によって作製したものについても実施していく。

圧延と鍛造による結晶粒の微細化により高性能高シリコンステンレス鋼を生産性よく作製することが可能であることが確認できたので、今後、残課題を解決した後に、最適な生産工程を確立し、皿ばねについては事業化展開を行なっていく。

さらに、この材料と工法により、高強度ボルトや高強度シャフト等への展開が可能であるため、こうした製品へ適用すべく工程の開発を行い、事業化していきたいと考える。今後、省エネルギー社会においては、構造物の軽量化が求められることになる。本研究開発による高シリコンステンレス鋼は、材料強度の向上により軽量化が可能となると共に、長寿命によりメンテナンス頻度を下げることが可能となるため、大きな市場が期待できると考えられる。

事業化のステップとしては、以下のことを想定している。

- 1) 最適化した生産工程の確立。
- 2) マシニングセンター用皿ばねの生産。
- 3) 高強度ボルトの工程開発。
- 4) 高強度ボルトの生産。

#### 【参考文献】

- 1) 特許 4200520 出願人 株式会社豊和 発明者 小田敏郎
- 2) 特許 4250645 出願人 東海バネ工業株式会社 発明者 米澤輝雄 他2名
- 3) 特許 177187 出願人 株式会社ジェイテクト、東海バネ工業株式会社 発明者 米澤輝雄 他1名
- 4) 「微細化技術による耐食性に優れた皿ばね用鋼（SP320）の開発」日本ばね学会 2005年度秋季講演会講演論文集 p. 30-34