

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「ステンレス製品の冷間鍛造・CR 加工技術開発」

研究開発成果等報告書

平成 22 年 6 月

委託者 北海道経済産業局

委託先 北日本精機株式会社

目次

第1章 研究開発概要

1-1	研究背景	1
1-2	研究目的および目標	1
1-3	研究体制	1
1-3-1	研究組織および管理体制	1
1-3-2	管理員および研究員	2
1-4	研究成果概要	3
1-5	当該プロジェクト連絡窓口	4

第2章 本論

2-1	緒言	5
2-2	実験方法	5
2-2-1	材料成分の選定	7
2-2-2	冷間鍛造	8
2-2-3	焼なまし	9
2-2-4	CR	11
2-2-5	切削	12
2-2-6	熱処理	12
2-2-7	直行表の割付	12
2-2-8	最適条件の選定	13
2-2-9	再現性確認	14
2-3	実験結果	15
2-3-1	材料成分の分析	15
2-3-2	鋼線の変形抵抗測定	15
2-3-3	冷間鍛造金型の摩耗量測定	17
2-3-4	冷間鍛造完了品のメタルフロー観察	17
2-3-5	焼なまし完了品の平面・断面硬さ測定	18
2-3-6	焼なまし完了品の変形抵抗測定	19
2-3-7	焼なまし完了品の金属組織観察	21
2-3-8	CR 工具の摩耗量測定	22
2-3-9	CR 完了品の外径真円度測定	23
2-3-10	CR 完了品のメタルフロー観察	23
2-3-11	切削刃具の摩耗量測定	24
2-3-12	熱処理完了品の平面・断面硬さ測定	25
2-3-13	最適条件の選定	26
2-4	確認実験	27
2-4-1	鋼線の変形抵抗測定	27

2-4-2	冷間鍛造金型の摩耗量測定	28
2-4-3	焼なまし完了品の変形抵抗測定	29
2-4-4	CR 工具の摩耗量測定	30
2-4-5	切削刃具の摩耗量測定	30
2-4-6	確認実験のまとめ	31
2-5	コスト削減率の算定	31
2-6	結言	32
第3章 総括		
3-1	研究成果	33
3-2	残された課題	33
3-3	今後の展望	33
参考文献		34

第1章 研究開発概要

1-1 研究背景

ステンレス軸受は、防錆性、耐腐食性、耐熱性等の面から各種使用環境への適応性が高く、自動車産業、医療機器、食品関連機器、環境関連機器といった多くの川下産業における潜在需要は多いが、高炭素クロム軸受鋼（以下 SUJ2 と称する）を用いた一般の軸受に比し、材料コストが高く、難加工性であることから結果として軸受価格が高く、コスト低減を強力に進める川下企業はステンレス軸受の選択には消極的であり、その採用は限定的なものになっている。

更に、ステンレス軸受を供給する側の責任として、ステンレス軸受の生産技術に関する材料歩留まり改善をはじめとする工具寿命や加工時間短縮等の製造コスト低減及び生産性改善の課題に対する新たな技術開発が大幅に遅れているのも事実であり、その課題の克服が必要である。

以前よりステンレス鋼は難加工材であることは周知されているが、近年の材料製造技術向上（安定）、金型や工具の材質改善・表面処理技術の向上から、その技術課題をクリアすることは十分に可能であると考えられる。

1-2 研究目的および目標

本研究開発では、上記の課題を解決するために「北日本精機株式会社」が SUJ2 の量産加工技術として確立した、冷間鍛造と冷間ローリング（以下 CR と称する）の組合せによる加工技術をステンレス鋼の加工へも応用、材料、金型・工具、熱処理等の最適化により量産品質の確保を前提とした中でステンレス軸受製造コストの低減を図り、ステンレス軸受の価格低減（SUJ2 軸受とステンレス軸受の価格比 1:3 を 1:2.5 へ下げる）、および川下産業の需要変動に対応できるフレキシブルな供給体制の確立により、その需要拡大と潜在する需要の開拓を目指す。

【参考】冷間鍛造・CR 技術

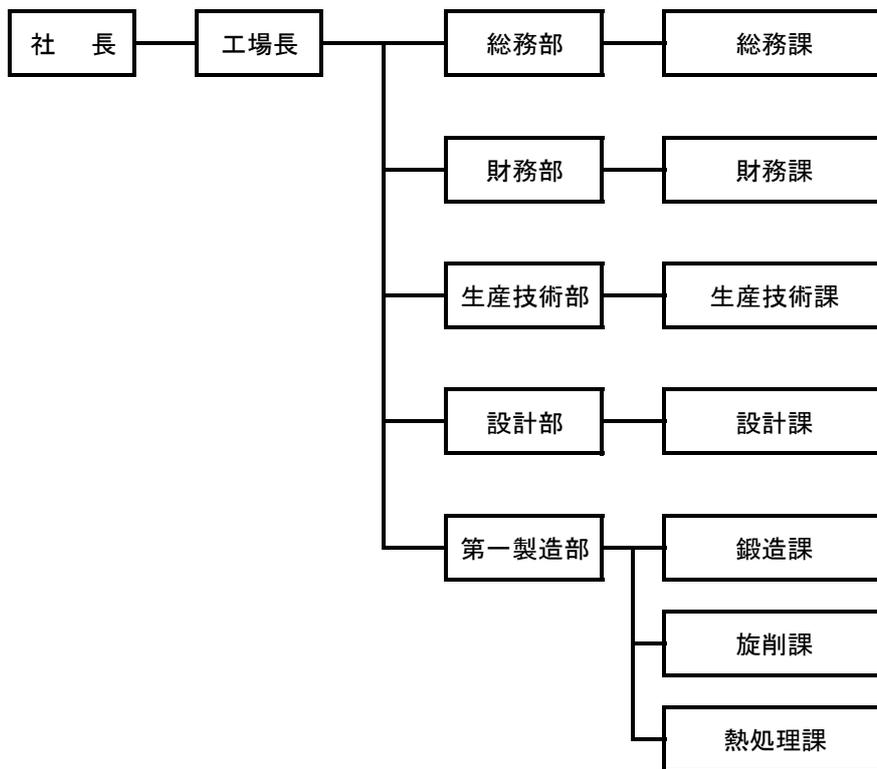
鋼線を切断し冷間鍛造により内外輪単品成形もしくは内外輪同時成形し、拡管性及び工具寿命向上のための焼なまし処理、平面研削を行った上で外輪を CR 加工、また内輪を切削加工することにより軸受を製造する技術。従来のステンレス軸受は棒鋼を全切削する製造方法の為、当該技術により SUJ2 材では従来比 30%のコスト低減に成功している。

1-3 研究体制

1-3-1 研究組織および管理体制

- | | |
|-------|-----------|
| ①研究組織 | 北日本精機株式会社 |
| 事業管理者 | 同上 |

②管理体制



1-3-2 管理員及び研究員

【事業管理者】 北日本精機株式会社

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)※
岡本 文男	工場長	④
新屋敷 聡	総務部長	④
山下 益広	総務部 総務課長	④
倉橋 勝彦	財務部長	④
高橋 旭	財務部 財務課長	④

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)※
岡本 文男(再)	工場長	①、②、③
脇島 信之	工機部 部長	①、②、③
横須賀 紀昭	生産技術部長	①、②、③、④
八木 清治	生産技術部 生産技術課 係長	②、③
佐々木 寿和	生産技術部 生産技術課 係長	①、②、③
尾田 明穂	生産技術部 生産技術課 係長	③
大野 富美雄	設計部長・研究開発部長	①、②、③、④
江本 尚弘	設計部 係長	①、②、③、④
佐藤 栄次	第一製造部長	①、②、③
吉澤 和志	第一製造部旋削課 鍛造係長	①、②
青山 誠司	第一製造部旋削課 課長	①、②
及川 慎一	第一製造部熱処理課 課長	③

実施内容欄の番号は次の開発項目を示す。

- ① 冷間鍛造・CRに適したステンレス軸受鋼の成分組成の研究と選定
- ② 長寿命・低コストの量産用金型・工具の研究と選定
- ③ 加工硬化に対応する、CR加工の拡管性や工具寿命に最適な焼なまし条件の研究と設定
- ④ 研究開発会議の管理・運営、研究開発会議の開催、報告書作成

1-4 研究成果概要

タグチメソッドを用いて鋼線の材料成分、冷間鍛造金型の材質・コーティング、焼なまし温度、CR送り速度、CRワーク回転数、CR送り圧力を総合的に評価、改善することにより以下の成果が得られた。

- (1) 冷間鍛造、CRそして切削に適したステンレス軸受鋼の成分組成はMn：0.25%、Si：0.20%となった。
- (2) 冷間鍛造において変形抵抗を最も低減でき、且つ次工程以降の低コスト化に最適な冷間鍛造金型の条件は材質：REA35、コーティング：TiCNとなった。
- (3) 総コスト低減に最適な焼なまし温度は550 [°C] であった。
- (4) CR加工の最適条件として選定したCR送り速度：8 [m/min]、CRワーク回転数：85 [min⁻¹]、CR送り圧力：6 [Pa] は加工時間短縮に寄与するだけでなく、CR完了品の外径真円度抑制の効果も確認できた。

以上のように選定した製造条件による総コスト削減率は目標値の16.7%には及ばないものの、11.1%のコスト削減が達成でき、品質も従来品と同等以上が得られることが知見された。

1-5 当該プロジェクト連絡窓口

〒079-1397

北海道芦別市上芦別町26番地23号

北日本精機株式会社 本社（最寄り駅：JR北海道 根室本線 芦別駅）

担当：新屋敷

電話：0124-22-1250

FAX：0124-22-1038

第2章 本論

2-1 緒言

ステンレス軸受とは耐食性に優れており、且つ焼入によって高い硬さが得られるステンレス鋼を使用しているため腐食性雰囲気や防錆剤が使用できない環境で使用することができる軸受である。その具体的な用途には、図 2-1 に示すような (a) 自動車関連部品、(b) 医療機器、(c) 食品加工機、(d) 釣具などが挙げられる。このようにステンレス軸受は特殊環境で使用でき、用途も幅広いが、一般的な軸受材料である SUJ2 と比較して材料コストが高く、また SUJ2 よりも加工硬化性が大きいいため変形抵抗が高く、冷間鍛造性が悪い⁽¹⁾。よって加工コストも高くなってしまふ。そのためステンレス軸受の価格が高額となり、ユーザーはステンレス軸受を選択することに抵抗感を抱き、採用は限定的なものとなっている。

そこで本研究開発では、これまでの製造工程である「切断」→「穴抜き」→「親子取り」→「外輪切削」→「内輪切削」から加工時間の短縮および材料歩留まりの改善が見込める「冷間鍛造」→「焼なまし」→「CR」→「平面研削」→「外面研削」→「切削」という製造工程を採用する。この製造工程に変更することによって製造コストをおおよそ 10% 削減でき、また製造条件の最適化を図ることで更に大きなコスト削減が期待できる。ただし、既存の方法で製造した製品と同一以上の品質が得られることを確認する必要がある。このようにして製造コストを低減させることでユーザーにステンレス軸受を幅広く利用してもらうことを本研究開発の目的とする。

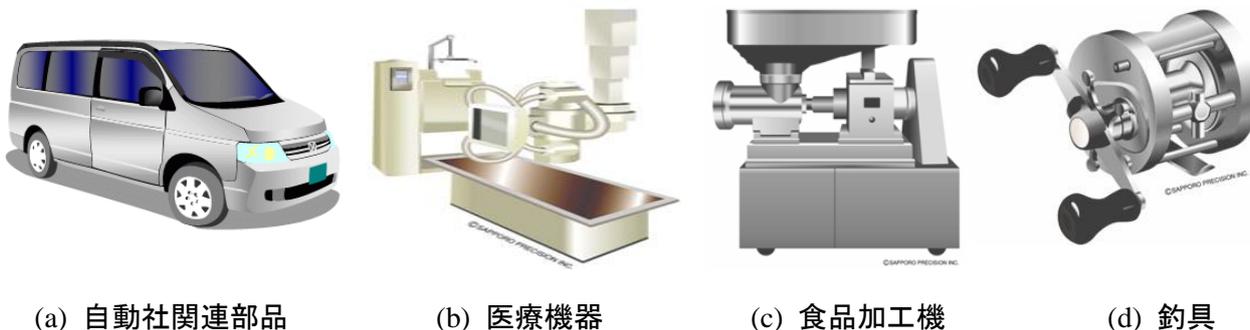
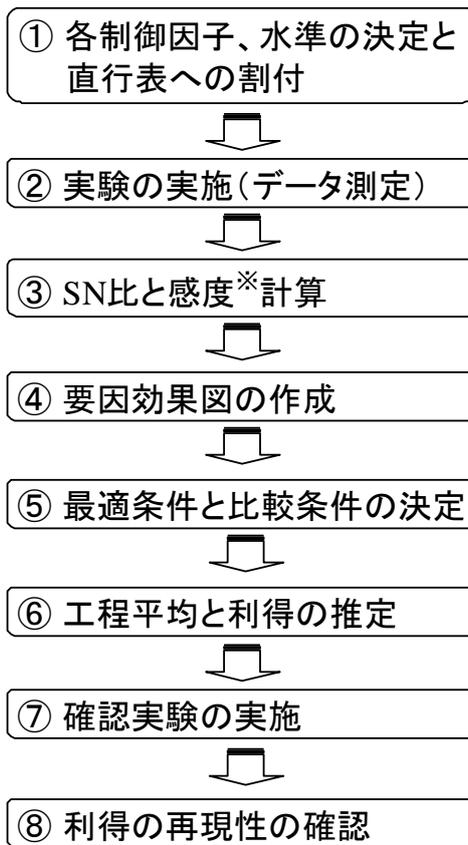


図 2-1 ステンレス軸受の使用用途例

2-2 実験方法

本実験で対象とするステンレス軸受は外径 35mm の製品とする。鋼線はこれまで使用していたステンレス鋼の化学成分を規格内で調整することによって冷間加工性の向上を図る。各工程での製造条件の選定および品質調査内容については次頁以降の各項目で詳細を示す。

各条件における最適条件の選定についてはタグチメソッドの静特性評価を用いる。タグチメソッドとは、田口玄一博士が開発し、日本では品質工学と呼ばれており、技術開発・新製品開発を効率的に行う実験手法である。タグチメソッドの静特性評価手順を図 2-2 に示す⁽²⁾。タグチメソッドの静特性評価には「一般の望目特性」、「ゼロ目標の望目特性」、「望小特性」、「望大特性」の 4 つがあり本実験では「一般の望目特性」および「望小特性」を使用する。また本実験で使用する直行表は表 2-1 に示す L18 直行表とする。



※望小特性で評価した場合は感度の計算は行わない

図 2-2 タグチメソッドによる評価手順

表 2-1 L18 直行表

試料No.	制御因子							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

2-2-1 材料成分の選定

従来使用していたステンレス鋼の化学成分量は表 2-2 に示す通りである。この内 Si と Mn は焼入性を高めるために必要な元素ではあるが、含有量が多すぎると冷間加工性を低下させる作用がある。そこで本実験では Si と Mn の含有量をステンレス鋼の規格内（1.00%以下）で調整することによって冷間加工性を向上させ、且つ必要な焼入性も確保できる最適条件を決定する。

今回選定した 9 種類の材料を表 2-3 に示す。これらは Si、Mn 各々 3 水準を L18 直行表の割付により組み合わせたものであり、材質名を KS440M1~9 とした。なお、現行材のステンレス鋼の化学成分に最も近い材質は Si、Mn の含有量が最も多い KS440M9 である。実際の含有量の確認には図 2-3 に示す電子顕微鏡・エネルギー分散型 X 線分析装置を使用した。また KS440M1~9 の冷間加工性を評価するために図 2-4 に示す圧縮試験機を用いて変形抵抗の測定を行った。変形抵抗とは、材料を変形させるために必要な応力のことで、これが大きいと成型時の加工力が高くなる。つまり金型の磨耗や塑性変形・破壊が起こりやすくなることを意味する⁽³⁾。

表 2-2 ステンレス鋼の化学成分

化学成分 [mass%]						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.60~0.75	1.00以下	1.00以下	0.030以下	0.020以下	11.50~13.00	0.30以下

表 2-3 KS440M1~9 の Si、Mn 成分量*

材質名	Si	Mn
KS440M1	0.01~0.10 (0.05)	0.15~0.35 (0.25)
KS440M2	0.01~0.10 (0.05)	0.35~0.55 (0.45)
KS440M3	0.01~0.10 (0.05)	0.55~0.75 (0.65)
KS440M4	0.11~0.18 (0.125)	0.15~0.35 (0.25)
KS440M5	0.11~0.18 (0.125)	0.35~0.55 (0.45)
KS440M6	0.11~0.18 (0.125)	0.55~0.75 (0.65)
KS440M7	0.15~0.25 (0.20)	0.15~0.35 (0.25)
KS440M8	0.15~0.25 (0.20)	0.35~0.55 (0.45)
KS440M9	0.15~0.25 (0.20)	0.55~0.75 (0.65)

※ () 内は中央値を表す。



図 2-3 電子顕微鏡・エネルギー分散型 X 線分析装置



図 2-4 圧縮試験機

2-2-2 冷間鍛造

冷間鍛造では金型材種および金型コーティングの検討を行った。金型材種はサンアロイ工業(株)製の RD20 と REA35 の 2 種類を選定した。RD20 は超硬工具協会規格 CIS019D 分類では VM30 に相当し、耐摩耗性と強度が要求される場合に使用される材質であり、REA35 は CIS019D 分類では VC40 に相当し、靱性を重視した耐衝撃性が要求される場合に使用される材質である。RD20 と REA35 の各特性値を表 2-4 に示す。金型コーティングは AlCrN、TiAlN、TiCN の 3 種類を選定した。AlCrN は耐酸化性に、TiAlN は耐熱性に優れている。TiCN は高硬度であり、摩擦係数が低い。AlCrN、TiAlN、TiCN の各特性値を表 2-5 に示す。

冷間鍛造金型の摩耗量の評価方法はワーク 1000 個加工後の金型真円度を図 2-5 に示す真円度測定機で測定し摩耗量を評価した。実際に使用した冷間鍛造金型を図 2-6 に、加工に使用した冷間鍛造機を図 2-7 に示す。

またアドバイザーである日本高周波鋼業(株)の協力を得て冷間鍛造品のメタルフローを観察した。観察面は図 2-8 に示す通りである。

表 2-4 金型材質の特性値

材質名	比重[g/cm ³]	抗折力[GPa]	硬度[HV]	圧縮強度[GPa]	破壊靱性[Mpa・m ^{1/2}]
RD20	14.8	2.9	1630	5.5	14
REA35	14.6	3.3	1350	4.7	17

表 2-5 金型コーティングの特性値

コーティング種類	硬度[HV]	摩擦係数	耐熱温度[°C]	膜厚[μm]
AlCrN	3200	0.35	1100	1~2
TiAlN	2900	0.35	1100	2~5
TiCN	3400	0.20	850	4~8



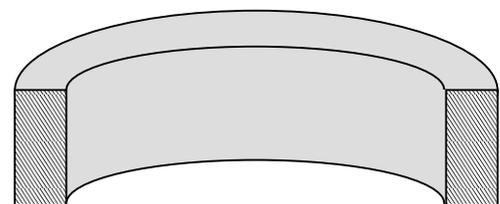
図 2-5 真円度測定機



図 2-6 冷間鍛造金型



図 2-7 冷間鍛造機



■ : メタルフロー観察面

図 2-8 メタルフロー観察面

2-2-3 焼なまし

冷間鍛造で生じた残留応力を除去し、また次工程である CR における加工性を改善することを目的として A1 変態点温度以下に加熱後冷却する低温焼なましを行う。低温焼なましは通常適用される場合の下限温度 550°C と A1 変態点温度に近い 700°C で実施する。焼なましは図 2-9 に示した真空炉で行う。また焼なまし実施時の CR 工具寿命の改善額よりも焼なましコストが上回ることも想定されるため焼なましを実施しない条件も加えることにした。

焼なまし完了後には各ワークの平面硬さを図 2-10 に示すロックウェル硬さ試験機で、断面硬さを図 2-11 に示すマイクロビッカース硬さ試験機で測定を行う。なお、平面・断面の測定位置については図 2-12 に示す通り各 3 箇所ずつ行う。

CR の加工性評価のために図 2-4 に示した圧縮試験機を用いて変形抵抗の測定を行う。また図 2-3 で示した電子顕微鏡を用いて金属組織の二次電子像の観察を行う。



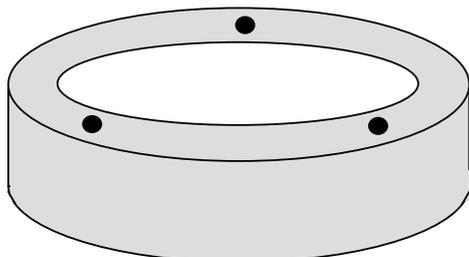
図 2-9 焼なまし実施真空炉



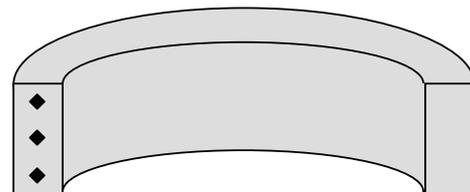
図 2-10 ロックウェル硬さ試験機



図 2-11 マイクロビッカース硬さ試験機



● : 平面硬さ測定位置



◆ : 断面硬さ測定位置

図 2-12 硬さ測定位置

2-2-4 CR

CRの加工条件の中で工具寿命および加工時間に及ぼす影響が大きいのは「送り速度」、「ワーク回転数」、「送り圧力」の3項目であり、当社で実績のあるSUJ2材でのCR加工条件を基準（第2水準値）として第1水準値と第3水準値を決定した。各条件における各水準値は以下の表2-6に示す。CRでワーク1000個を加工した後のCR工具の摩耗量を図2-13に示す形状粗さ測定機を用いて測定する。加工に使用したCR機を図2-14に、CR工具でワークの真円度矯正を行う(a)サイジング工具、外側形状の調整を行う(b)成型ロール工具、内側形状の調整を行う(c)マンドレル工具を図2-15に示す。また次の切削工程の加工性に生じる影響が大きいCR完了後の外径真円度を図2-5に示す真円度測定機を用いて測定する。冷間鍛造完了品と同様に図2-8で示した断面のメタルフロー観察を行った。

表 2-6 CR 加工条件

制御因子	第1水準	第2水準	第3水準
送り速度[m/min]	3.0	5.5	8.0
ワーク回転数[min^{-1}]	85	90	95
送り圧力[Pa]	4	6	8



図 2-13 形状粗さ測定機



図 2-14 CR 機

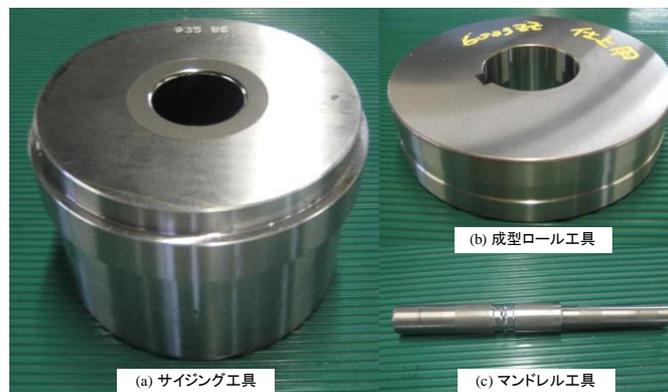


図 2-15 CR 工具

2-2-5 切削

切削工程では加工後の刃具摩耗量を図 2-3 で示した電子顕微鏡で撮影・測定し、各試料の刃具摩耗量を評価する。切削に使用した単能盤を図 2-16 に、刃具写真を図 2-17 に示す。



図 2-16 単能盤

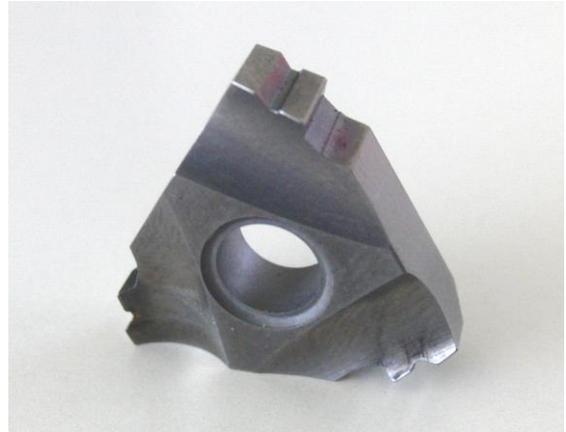


図 2-17 切削刃具

2-2-6 熱処理

北日本精機株式会社で規定している熱処理条件を基に焼入・焼戻を実施した後に平面・断面硬さの測定をそれぞれ図 2-10、図 2-11 で示したロックウェル硬さ試験機、マイクロビッカース硬さ試験機で測定する。測定位置は図 2-12 の通りに行う。熱処理は図 2-18 で示した真空炉で実施する。また図 2-3 の電子顕微鏡を用いて熱処理完了品の金属組織観察を行う。



図 2-18 焼入・焼戻実施真空炉

2-2-7 直行表への割付

以上のように決定した制御因子の水準値を表 2-7 に示す。またその値を表 2-1 に示した L18 直行表に割付けた結果を表 2-8 に示す。この表に示す No.1~18 の 18 種類の試料で実験を行う。

表 2-7 制御因子の水準値

制御因子	第1水準	第2水準	第3水準
金型材質	RD20	REA35	-
金型コーティング	AlCrN	TiAlN	TiCN
Mn成分[%]	0.25	0.45	0.65
Si成分[%]	0.050	0.125	0.200
CR送り速度[m/min]	3.0	5.5	8.0
CRワーク回転数[min^{-1}]	85	90	95
CR送り圧力[Pa]	4	6	8
焼なまし温度[$^{\circ}\text{C}$]	550	700	20

表 2-8 直行表への割付

試料No.	金型材質	金型コーティング	Mn成分[%]	Si成分[%]	CR送り速度[m/min]	CRワーク回転数[min^{-1}]	CR送り圧力[Pa]	焼なまし温度[$^{\circ}\text{C}$]
1	RD20	AlCrN	0.25	0.050	3.0	85	4	550
2	RD20	AlCrN	0.45	0.125	5.5	90	6	700
3	RD20	AlCrN	0.65	0.200	8.0	95	8	20
4	RD20	TiAlN	0.25	0.050	5.5	90	8	20
5	RD20	TiAlN	0.45	0.125	8.0	95	4	550
6	RD20	TiAlN	0.65	0.200	3.0	85	6	700
7	RD20	TiCN	0.25	0.125	3.0	95	6	20
8	RD20	TiCN	0.45	0.200	5.5	85	8	550
9	RD20	TiCN	0.65	0.050	8.0	90	4	700
10	REA35	AlCrN	0.25	0.200	8.0	90	6	550
11	REA35	AlCrN	0.45	0.050	3.0	95	8	700
12	REA35	AlCrN	0.65	0.125	5.5	85	4	20
13	REA35	TiAlN	0.25	0.125	8.0	85	8	700
14	REA35	TiAlN	0.45	0.200	3.0	90	4	20
15	REA35	TiAlN	0.65	0.050	5.5	95	6	550
16	REA35	TiCN	0.25	0.200	5.5	95	4	700
17	REA35	TiCN	0.45	0.050	8.0	85	6	20
18	REA35	TiCN	0.65	0.125	3.0	90	8	550

2-2-8 最適条件の選定

以上のように加工を行い、各工程におけるコスト削減効果の評価および品質確認を実施し、上記表 2-7 の中から最適条件を選定する。なお、一般の望目特性の SN 比、感度は (2-1) ~ (2-4) 式から導出した (2-5)、(2-6) 式で、望小特性の SN 比は (2-7)、(2-8) 式から導出した (2-9) 式で、工程平均、利得、改善効果はそれぞれ (2-10)、(2-11)、(2-12) 式で計算^{(4),(5)}した。

一般の望目特性（特性値 y が n 個ある場合）

$$\text{全変動 } S_T = y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2 \quad \dots \dots \dots (2-1)$$

$$\text{平均値の変動 } S_m = \frac{(y_1 + y_2 + \dots + y_n)^2}{n} \quad \dots \dots \dots (2-2)$$

$$\text{誤差変動 } S_e = S_T - S_m \quad \dots \dots \dots (2-3)$$

$$\text{誤差分散 } V_e = \frac{S_e}{n-1} \quad \dots \dots \dots (2-4)$$

$$\text{SN 比 } \eta = 10 \log \frac{\frac{1}{n}(S_m - V_e)}{V_e} \quad (\text{db}) \quad \dots \dots \dots (2-5)$$

$$\text{感度 } S = 10 \log \left[\frac{1}{n}(S_m - V_e) \right] \quad (\text{db}) \quad \dots \dots \dots (2-6)$$

望小特性（特性値 y が n 個ある場合）

$$\text{全変動 } S_T = y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2 \quad \dots \dots \dots (2-7)$$

$$\text{標準偏差 } \sigma^2 = \frac{S_T}{n} \quad \dots \dots \dots (2-8)$$

$$\text{SN 比 } \eta = -10 \log \sigma^2 \quad (\text{db}) \quad \dots \dots \dots (2-9)$$

工程平均、利得の推定

最適条件の工程平均

$$\eta_{OP} = \bar{T} + (A_a - \bar{T}) + (B_b - \bar{T}) + \dots + (N_n - \bar{T}) \quad \dots \dots \dots (2-10)$$

\bar{T} は SN 比の総平均であり、 $A, B, \dots; N$ は各制御因子、 a, b, \dots, c は各制御因子における最適条件の水準とする。同様に比較条件の工程平均 η_{CO} も計算する。

$$\text{利得 } \Delta \eta = \eta_{OP} - \eta_{CO} \quad \dots \dots \dots (2-11)$$

$$\text{改善効果 } Q = 10^{\frac{\Delta \eta}{20}} \quad \dots \dots \dots (2-12)$$

2-2-9 再現性確認

実験結果から得られた利得の再現性を評価するために確認実験⁽⁶⁾を実施する。確認実験では最適条件と比較条件の2つの条件で再度実験を行い、得られた利得と本実験の利得の推定値の差がおおよそ±30%の範囲内であれば、再現性があると判断する。ただし、これは過去の事例から得られた経験則であるため理論的根拠はない。

2-3 実験結果

2-3-1 材料成分の分析

材料成分の分析結果を表 2-9 に示す。Si、Mn 成分共に設定した規格内に入っており問題なかった。

表 2-9 材質別 Si、Mn 含有量分析結果

材質名	Si		Mn	
	規格	実測値	規格	実測値
KS440M1	0.01~0.10	0.04	0.15~0.35	0.26
KS440M2	0.01~0.10	0.04	0.35~0.55	0.44
KS440M3	0.01~0.10	0.04	0.55~0.75	0.65
KS440M4	0.11~0.18	0.12	0.15~0.35	0.26
KS440M5	0.11~0.18	0.11	0.35~0.55	0.44
KS440M6	0.11~0.18	0.11	0.55~0.75	0.63
KS440M7	0.15~0.25	0.17	0.15~0.35	0.24
KS440M8	0.15~0.25	0.18	0.35~0.55	0.44
KS440M9	0.15~0.25	0.18	0.55~0.75	0.65

2-3-2 鋼線の変形抵抗測定

鋼線の圧縮試験による変形抵抗の測定は次の条件で行った。試料片の概略図および圧縮方向を図 2-19 に示す。

【測定条件】

- ① 試験片寸法 $\phi 5.0 \times 5.0 \text{mm}$
- ② 試験温度 室温
- ③ 評価据え込み率 (ひずみ) 57%
- ④ 加工速度 16mm/sec

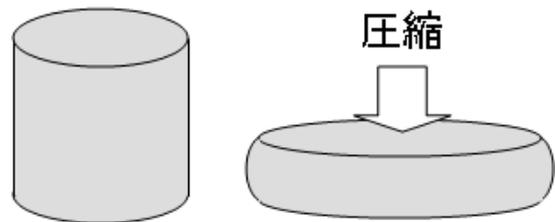


図 2-19 試料片概略図と圧縮方向

③評価据え込み率は次の (2-13) 式で計算した。

$$\text{評価据え込み率} = \frac{\text{冷間鍛造後のワーク高さ}}{\text{ワーク個採取するために必要な鋼線の長さ}} \dots (2-13)$$

- ④ 実際の冷間鍛造速度は 560mm/sec だが、今回使用した圧縮試験機の加工速度の上限が 16mm/sec だったためこの速度で実施した。

なお、変形抵抗は加藤⁽⁷⁾が提案する以下の (2-14) 式を採用して計算した。式中の σ は変形抵抗、 f は拘束係数、 P は試験荷重、 A_0 は初期横断面積を表している。

$$\sigma = \frac{1/f}{P/A_0} \dots \dots (2-14)$$

以上のように測定、計算した変形抵抗-ひずみ線図を図 2-20 に示す。この図の評価据え込み率 57%における変形抵抗は現行材の化学成分に最も近い KS440M9 が最も高く、KS440M2 が最も低い値となった。この結果をタグチメソッドの望小特性で評価した結果を図 2-21 に示す。この結果から Mn 成分が 0.45% のときにまた Si 成分は 0.050% のときに最も変形抵抗を低減できることがわかった。なお、全ての試料を据え込み率 70%程度まで圧縮したが全てにおいて割れは確認されなかった。試験前後の試料 (KS440M9) を図 2-22 に示す。

鋼線圧縮試験結果

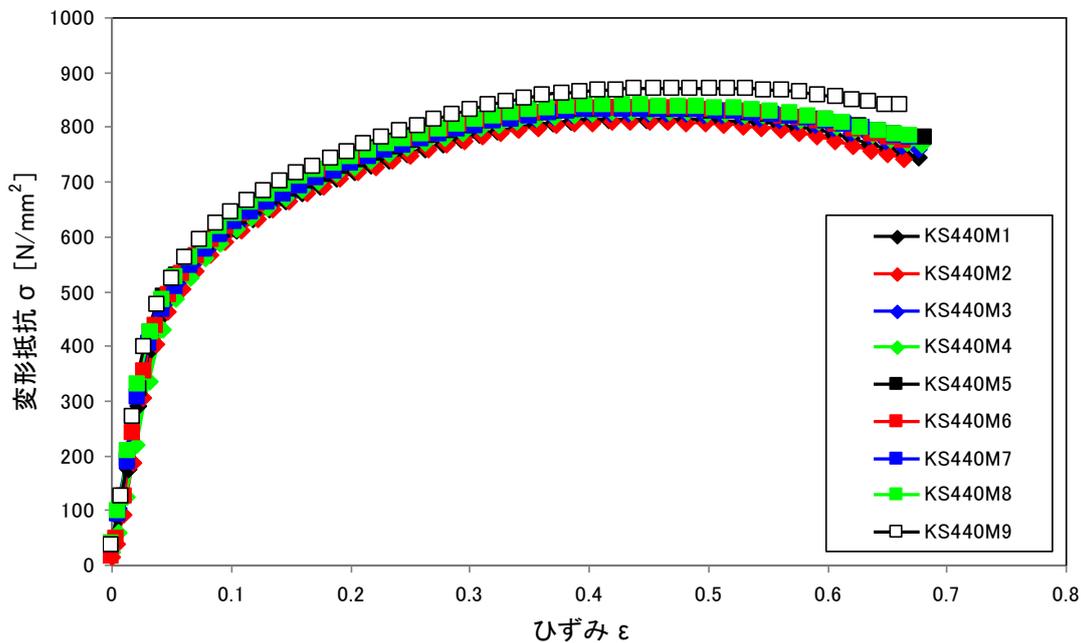


図 2-20 鋼線の変形抵抗-ひずみ線図

SN比の要因効果図(鋼線の変形抵抗)

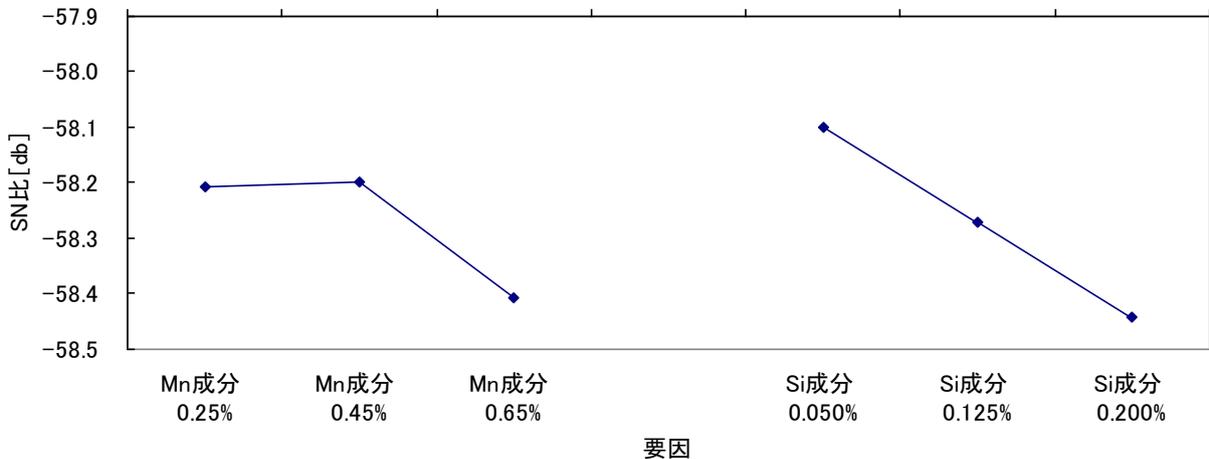


図 2-21 鋼線の変形抵抗に対する各制御因子の依存性



図 2-22 圧縮試験前後試料（左：試験前、右：試験後）

2-3-3 冷間鍛造金型の摩耗量測定

冷間鍛造後の金型真円度測定結果をタグチメソッドの望小特性で評価した結果を図 2-23 に示す。金型材質では RD20 の方が REA35 よりも若干ではあるが摩耗量の低減に効果があるという結果となった。金型コーティングでは TiCN が最も摩耗量の低減に寄与していることがわかった。冷間鍛造金型の摩耗量評価は図 2-20 に示した鋼線の変形抵抗に対する各制御因子の依存性と同様の傾向を示すはずであり、Si 成分については鋼線の変形抵抗による冷間加工性評価の結果と同じく 0.125% が最適条件となったが、Mn 成分については冷間鍛造金型の摩耗量評価ではほとんど影響しないという結果となった。

SN比の要因効果図(冷間鍛造金型摩耗量)

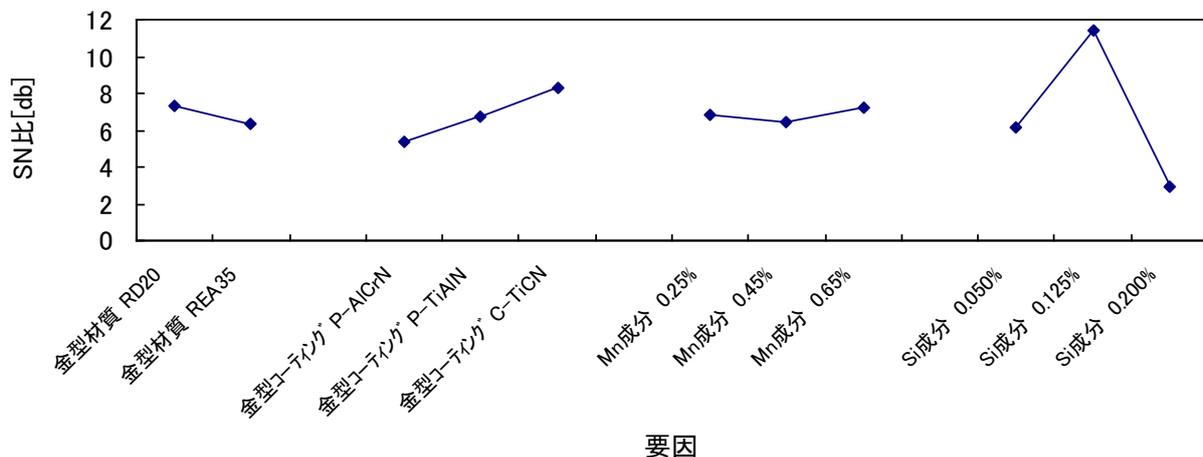


図 2-23 冷間鍛造金型摩耗量に対する各制御因子の依存性

2-3-4 冷間鍛造完了品のメタルフロー観察

冷間鍛造完了品のメタルフローを図 2-24 に示す。図に示したのは試料 No.3 のものであり、異常は確認されなかった。また他の試料についても異常は確認されなかった。

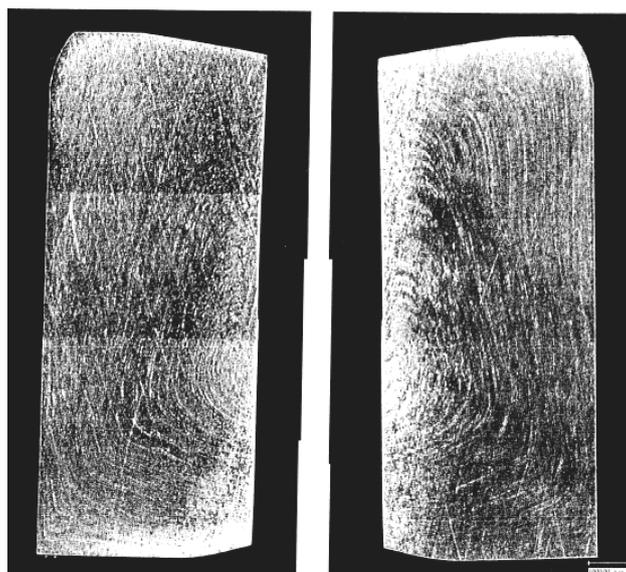


図 2-24 冷間鍛造完了品のメタルフロー

2-3-5 焼なまし完了品の平面・断面硬さ測定

焼なまし完了品の平面・断面硬さの測定結果を表 2-10 に示す。この結果をタグチメソッドの望小特性（硬さを低減できれば工具摩耗量を抑制できるという考え）を用いて評価した結果を図 2-25 に示す。この結果から平面・断面硬さは共に焼なまし温度以外にはほとんど依存しておらず、焼なまし温度は高い方が硬さを低減させるのに効果的であることがわかった。

表 2-10 焼なまし完了後の各試料の平面・断面硬さ

試料No.	平面硬さ[HRB]	断面硬さ[HRB]
1	96.6	99.7
2	87.0	90.2
3	104.5	104.3
4	104.4	105.4
5	96.4	93.6
6	89.5	89.9
7	105.3	104.8
8	96.7	96.9
9	89.6	90.6
10	97.5	96.9
11	90.3	90.5
12	105.9	104.5
13	90.9	90.5
14	104.8	103.8
15	97.6	96.8
16	88.9	88.2
17	105.2	105.9
18	98.7	96.5
Max	105.9	105.9
Min	87.0	88.2
Ave.	97.2	97.2

SN比の要因効果図(焼なまし完了品の平面・断面硬さ評価)

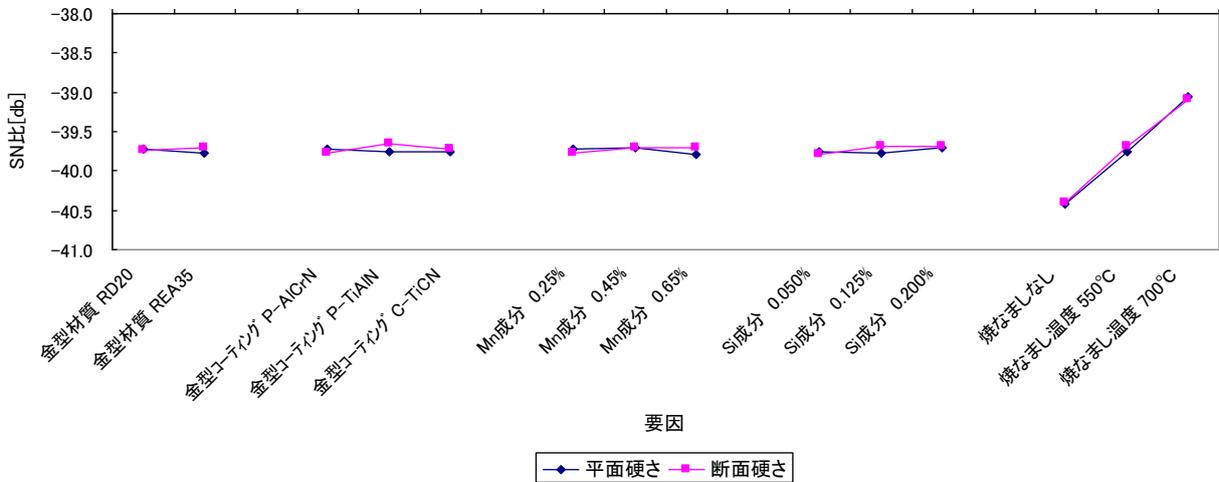


図 2-25 焼なまし完了品の平面・断面硬さに対する各制御因子の依存性

2-3-6 焼なまし完了品の変形抵抗測定

焼なましの次工程であるCRにおける冷間加工性評価のために焼なまし完了後試料の変形抵抗測定を以下の条件で行った。試料片の概略図および圧縮方向を図 2-26 に示す。

【測定条件】

- ① 試験片寸法 断面積 20mm²×高さ 4.0mm の直方体
- ② 試験温度 室温
- ③ 評価据え込み率 (ひずみ) 20%
- ④ 加工速度 4mm/sec

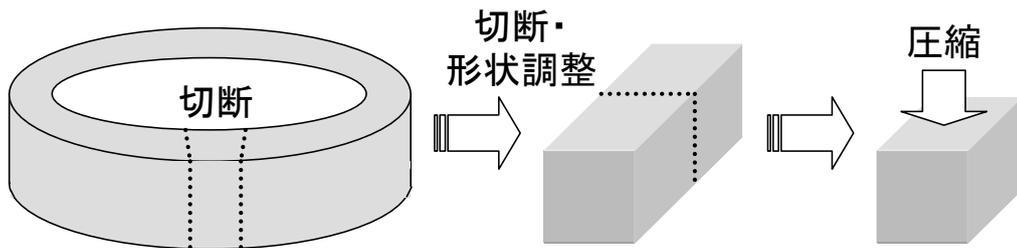


図 2-26 試験片概略図と圧縮方向

- ③評価据え込み率は (2-13) 式で計算した。
- ④加工速度 4mm/sec は実際のワークを加工する際のひずみ速度と同一のひずみ速度になるよう計算して得た値である。変形抵抗は (2-14) 式を採用して計算した。その結果を図 2-27 に示す。この結果をタグチメソッドの望小特性 (変形抵抗を低減できれば工具摩耗量を抑制できるという考え) を用いて評価した結果を図 2-28 に示す。この結果も焼なまし完了品の平面・断面硬さと同様に変形抵抗は焼なまし温度以外にほとんど依存しておらず、焼なまし温度を高くすれば変形抵抗を低く抑えられることが確認できた。

焼なまし完了品圧縮試験結果

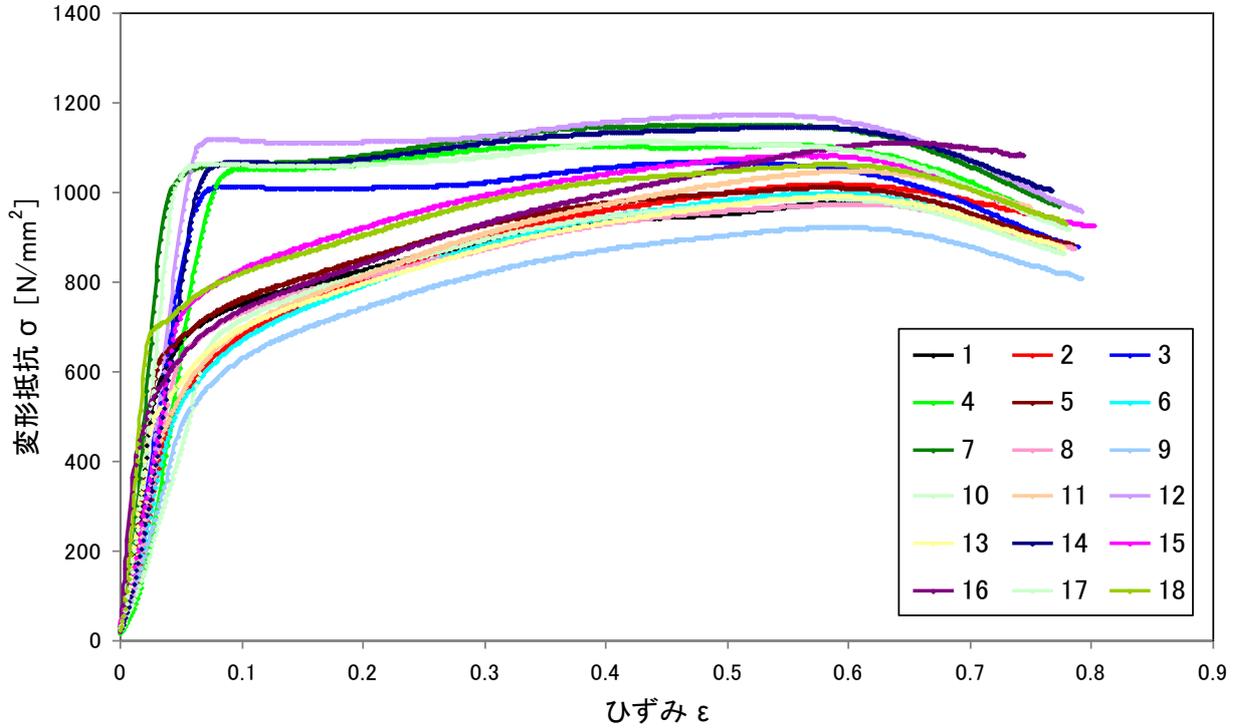


図 2-27 焼なまし完了品の変形抵抗-ひずみ線図

SN比の要因効果図(焼なまし完了品の変形抵抗)

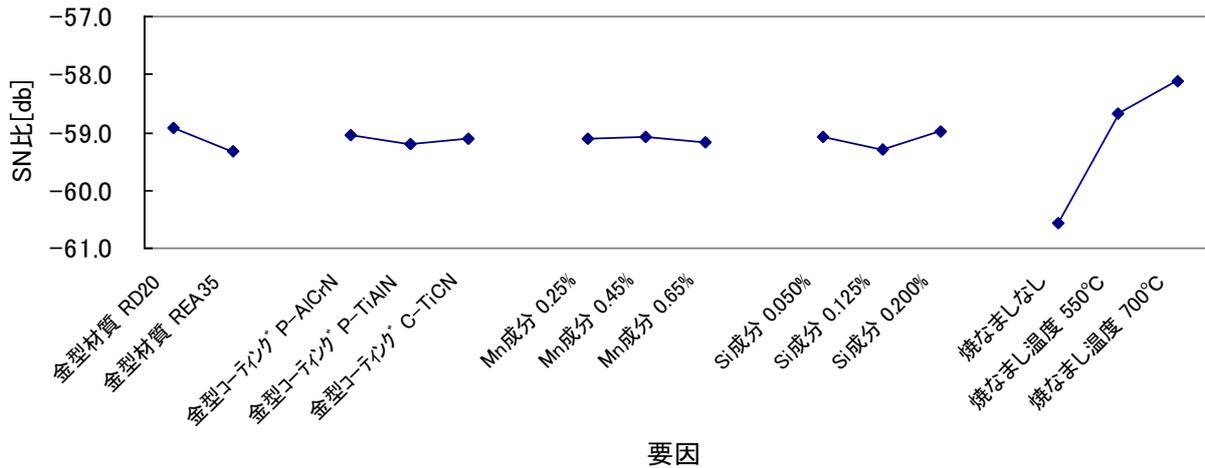


図 2-28 焼なまし完了品の変形抵抗に対する各制御因子の依存性

2-3-7 焼なまし完了品の金属組織観察

焼なまし完了後の金属組織の二次電子像を図 2-29 (a) 焼なましなし、(b) 焼なまし温度 550°C、(c) 焼なまし温度 700°Cに示す。一次炭化物の平均粒径は焼なましなし品が 1.01 μm 、焼なまし温度 550°C品が 1.00 μm 、焼なまし温度 700°C品が 1.05 μm であり、焼なましなし品と焼なまし温度 550°C品の平均粒径はほとんど大差がないのに対し、焼なまし温度 700°Cでは粗大化していることが確認できた。図 2-30 にタグチメソッドの望小特性を用いて評価した焼なまし温度が与える焼なまし完了品一次炭化物粒径への影響を示す。

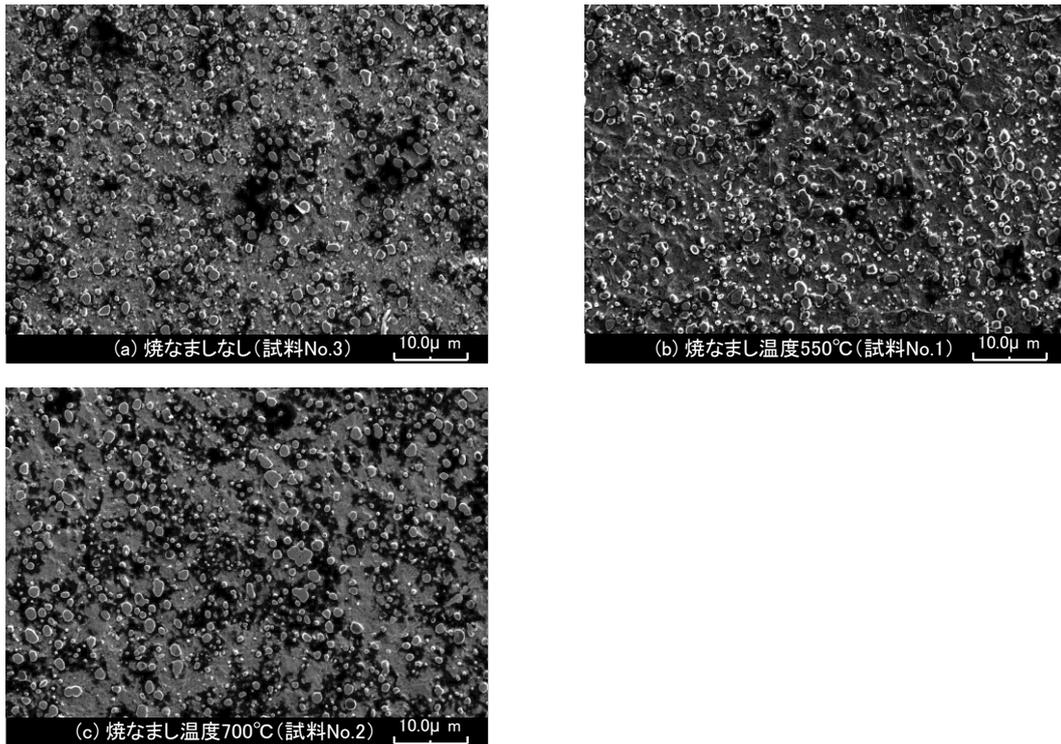


図 2-29 焼なまし完了品金属組織二次電子像

SN比の要因効果図(焼なまし完了品一次炭化物粒径評価)

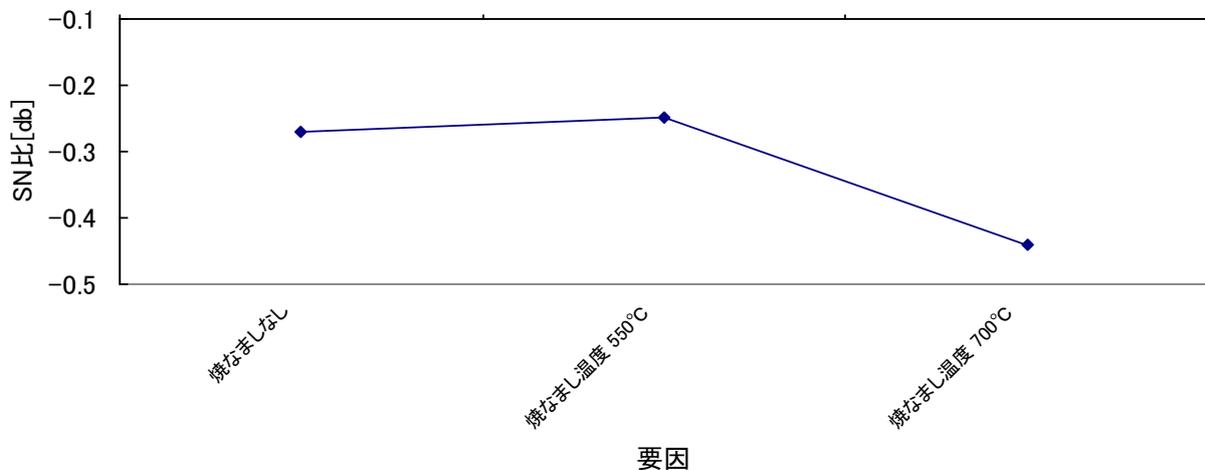


図 2-30 焼なまし温度が与える焼なまし完了品一次炭化物粒径への影響

2-3-8 CR 工具の摩耗量測定

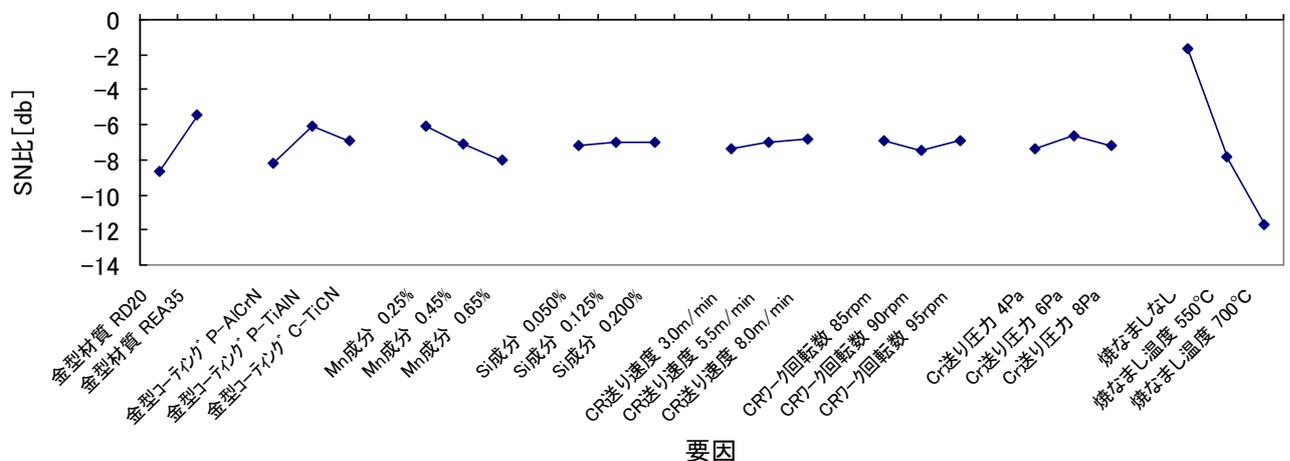
CR 工具摩耗量の測定結果を表 2-11 に示す。この結果をタグチメソッドの望小特性（工具摩耗量を抑制できれば工具の長寿命化につながるという考え）を用いて評価した結果を図 2-31 に示す。各制御因子の内、CR 摩耗抑制に最も寄与しているのは焼なまし温度であり、焼なましなしの場合が最も効果が高い。この結果は焼なまし完了品の変形抵抗測定結果とは異なる結果となった。

表 2-11 試料別 CR 工具摩耗量

試料No.	CR工具摩耗量[μm]
1	2.711
2	4.307
3	1.462
4	1.345
5	2.837
6	4.824
7	1.358
8	3.141
9	5.927
10	2.421
11	4.520
12	1.532
13	2.215
14	0.913
15	1.749
16	2.583
17	0.827
18	2.244
Max	5.927
Min	0.827
Ave.	2.606

図 2-31 CR 工具摩耗量に対する各制御因子の依存性

SN比の要因効果図(CR工具摩耗量評価)



2-3-9 CR 完了品の外径真円度測定

また CR 完了品の外径真円度測定結果をタグチメソッドの望小特性で評価した結果を図 2-32 に示す。この結果から CR 完了品の外径真円度を抑制するためには CR 送り速度を上げる必要があることがわかった。

SN比の要因効果図(CR完了品の外径真円度評価)

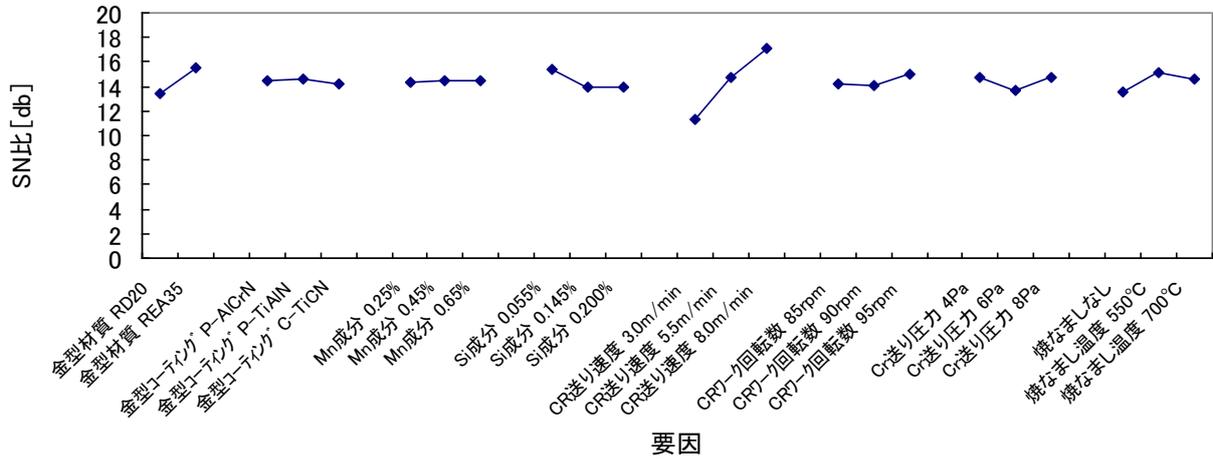


図 2-32 CR 工具摩耗量に対する各制御因子の依存性

2-3-10 CR 完了品のメタルフロー観察

CR 完了品のメタルフローを図 2-33 に示す。図に示したのは試料 No.3 のものであり、異常は確認されなかった。また他の試料についても異常は確認されなかった。

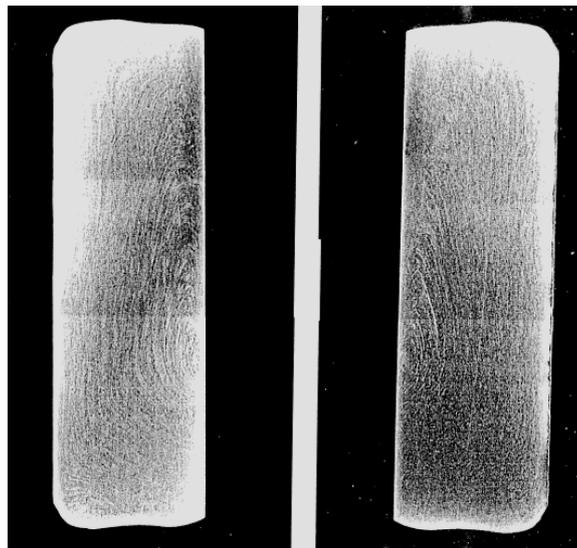


図 2-33 CR 完了品のメタルフロー

2-3-11 切削刃具の摩耗量測定

使用前後の切削刃具の二次電子像を図 2-34 に示す。(a) の使用前の刃具に比べて(b) の使用後の刃具は先端が摩耗していることがわかる。各試料の摩耗量の測定結果を表 2-12 に示す。またその結果をタグチメソッドの望小特性で評価した結果を図 2-35 に示す。この結果から切削後の刃具摩耗量は焼なまし温度に最も依存し、特に焼なまし温度 700°C のときに刃具摩耗量が大きくなるという結果となった。これは焼なまし完了時点では焼なまし温度が高い方が硬さの低減を図れるが、図 2-36 に示すように次工程の CR 加工による加工硬化により焼なまし温度による硬さへの影響が薄れ、また井上ら⁽⁸⁾が軸受鋼の析出炭化物粒径が増大すると被削性が低下すると報告しているように図 2-29 に示した焼なまし温度 700°C 品の平均 1 次炭化物粒径が焼なましなし品や焼なまし温度 550°C 品と比較して粗大化しているために被削性が低下したものと考えられる。

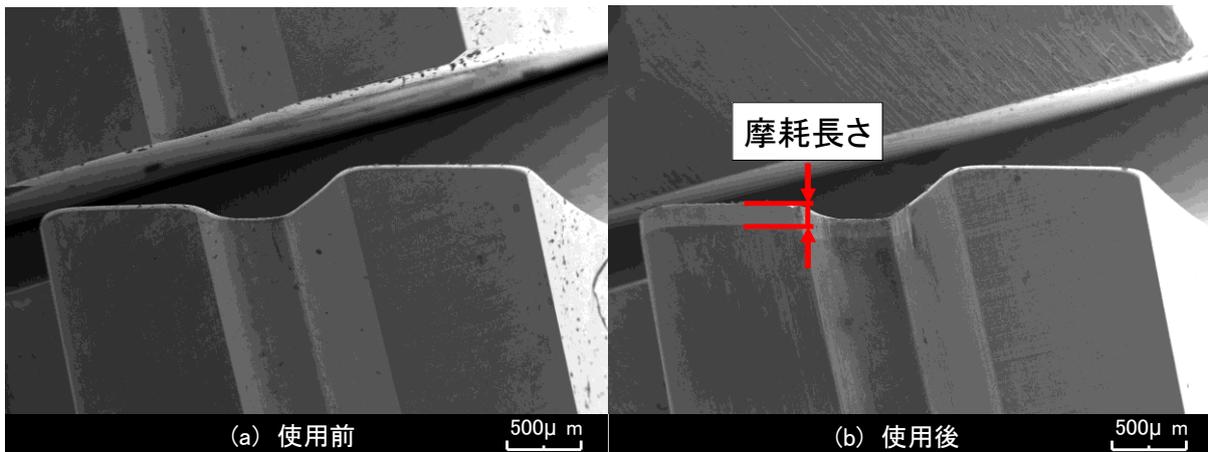


図 2-34 切削前後の刃具二次電子像

表 2-12 試料別切削後刃具摩耗量

試料No.	1000個切削後刃具摩耗量[μm]
1	100.8
2	136.4
3	121.4
4	125.1
5	116.1
6	130.4
7	90.6
8	87.0
9	118.6
10	81.9
11	124.3
12	97.5
13	122.3
14	97.4
15	122.1
16	123.9
17	90.3
18	132.3
Max	136.4
Min	81.9
Ave.	112.1

SN比の要因効果図(旋削後刃具摩耗量評価)

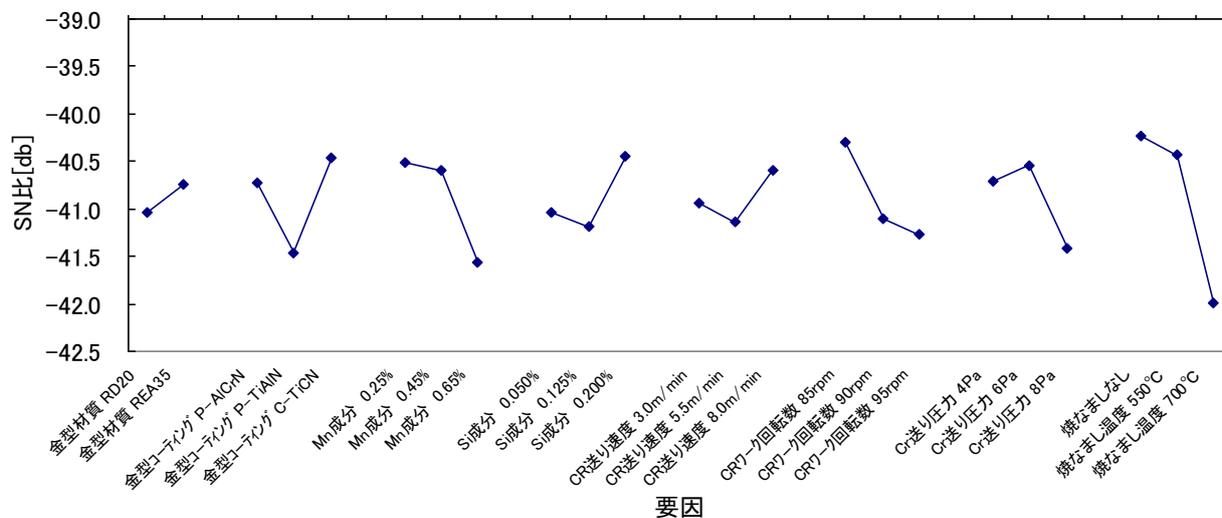


図 2-35 切削後刃具摩耗量に対する各制御因子の依存性

SN比の要因効果図(焼なまし温度による硬さ評価)

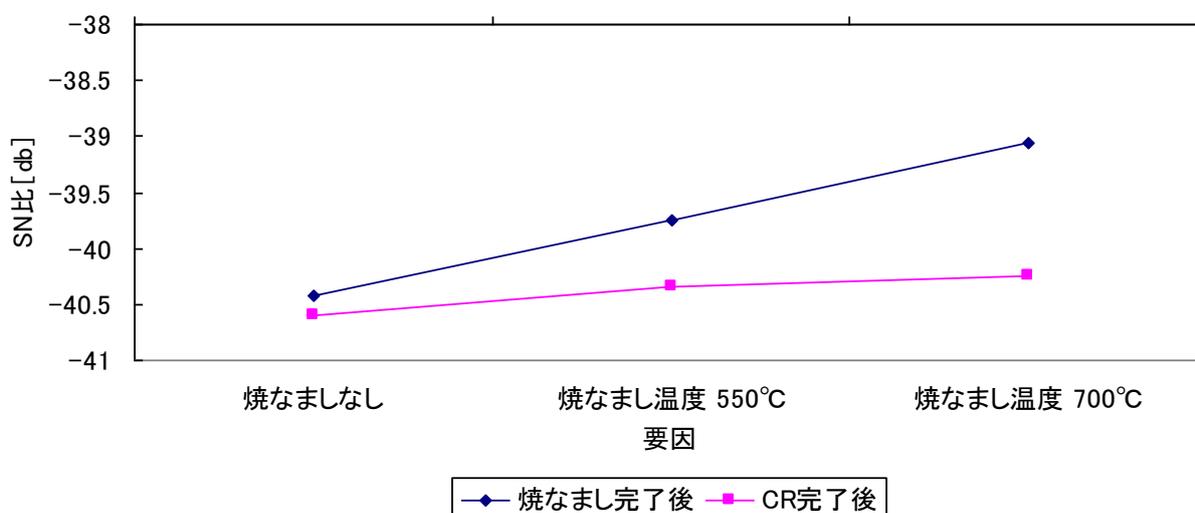


図 2-36 硬さに与える加工硬化の影響

2-3-12 熱処理完了品の平面・断面硬さ測定

熱処理完了後の各試料の平面・断面硬さは表 2-13 に示す通りである。この結果をタグチメソッドの望目特性を用いて評価した結果を図 2-37 に示す。なお、感度の評価結果については平面・断面硬さ共にどの制御因子にほとんど依存していなかったため省略する。SN 比の評価結果から平面・断面硬さに共通して影響を及ぼしている制御因子はなかった。今回測定した平面・断面硬さはいずれも工程能力 $Cpk \geq 1.33$ を満足していたので品質上の問題はないと判断した。

表 2-13 熱処理完了後の平面・断面硬さ

試料No.	平面硬さ[HRC]	断面硬さ[HRC]
1	59.52	59.83
2	59.52	59.73
3	59.78	59.80
4	59.70	59.87
5	59.84	60.20
6	59.92	60.03
7	59.80	59.63
8	59.72	59.63
9	59.80	59.43
10	59.62	59.57
11	59.64	59.73
12	59.78	59.47
13	59.66	59.63
14	59.92	59.77
15	59.88	59.50
16	59.74	59.63
17	59.68	59.70
18	59.80	59.73
Max	59.92	60.20
Min	59.52	59.43
Ave.	59.74	59.72

SN比の要因効果図(熱処理完了品の平面・断面硬さ評価)

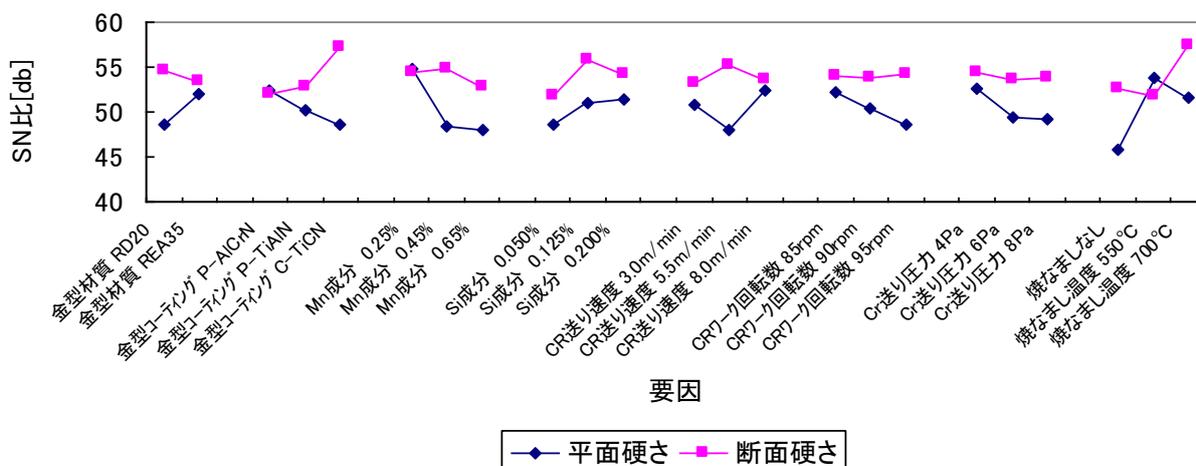


図 2-37 熱処理完了品の平面・断面硬さに対する各制御因子の依存性

2-3-13 最適条件の選定

全 18 種の試料において品質上の問題はなかったため最もコスト低減に寄与した条件を最適条件として選定する。コストに寄与する評価項目は

- ① 鋼線の変形抵抗評価・・・(2-3-2)
- ② 冷間鍛造金型摩耗量評価・・・(2-3-3)
- ③ 焼なまし完了品の変形抵抗評価・・・(2-3-6)
- ④ CR 工具摩耗量評価・・・(2-3-8)
- ⑤ 切削刃具摩耗量評価・・・(2-3-11)

以上の5種類である。このうち、鋼線の変形抵抗評価と冷間鍛造金型摩耗量評価、また焼なまし完了品の変形抵抗評価とCR工具摩耗量評価については同様の傾向を示すと思われたが、実際の結果は異なるものだったため、以下に示す2種類の最適条件で確認実験を行い、それぞれの信頼性を検証することにした。なお、確認実験では利得を計算するために最適条件の実験と共に比較条件での実験も行う。比較条件はSUJ2材での製造条件とした。

【最適条件1】

- ① 鋼線の変形抵抗評価
- ③ 焼なまし完了品の変形抵抗評価
- ⑤ 切削刃具摩耗量評価

【最適条件2】

- ② 冷間鍛造金型摩耗量評価
- ④ CR工具摩耗量評価
- ⑤ 切削刃具摩耗量評価

最適条件の選定結果を表2-14に示す。

表2-14 最適条件選定結果

制御因子	条件		
	最適条件1	最適条件2	比較条件
金型材質	REA35	REA35	REA35
金型コーティング	TiCN	TiCN	TiCN
Mn成分 [%]	0.25	0.25	0.65
Si成分 [%]	0.2	0.145	0.2
CR送り速度 [m/min]	8	8	5.5
CRワーク回転数 [min ⁻¹]	85	85	90
CR送り圧力 [Pa]	6	6	6
焼なまし温度 [°C]	550	なし	550

2-4 確認実験

本実験の再現性を検証するために2-3で選定した最適条件2種類と比較条件で確認実験を行う。実験評価は最適条件選定の際に参考にした次の5種類で行う。

- ① 鋼線の変形抵抗評価
- ② 冷間鍛造金型摩耗量評価
- ③ 焼なまし完了品の変形抵抗評価
- ④ CR工具摩耗量評価
- ⑤ 切削刃具摩耗量評価

2-4-1 鋼線の変形抵抗測定

最適条件1と比較条件で実施した鋼線の変形抵抗測定結果を図2-38に示す。またこの結果から得た最適条件1の利得を表2-15に示す。最適条件1の利得と本実験の結果から得た利得の推定値の差は共に±30%の範囲内であったためこの実験は再現性があると言える。

鋼線圧縮試験結果(確認実験)

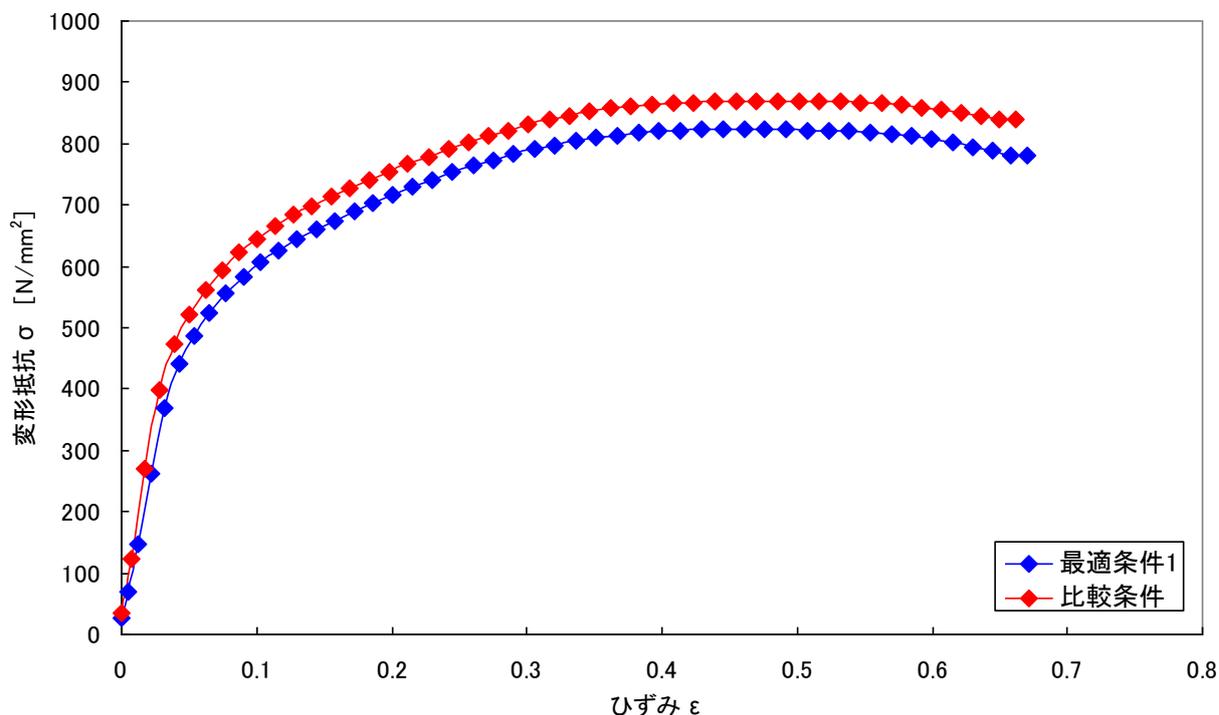


図 2-38 鋼線の変形抵抗-ひずみ線図 (確認実験)

表 2-15 鋼線変形抵抗の利得の再現性確認

条件	推定値	確認値
	η	
最適条件1	-58.099	-58.276
比較条件	-58.443	-58.715
利得	0.343	0.438

2-4-2 冷間鍛造金型の摩耗量測定

冷間鍛造金型摩耗量評価の確認実験から得られた最適条件 2 の利得を表 2-16 に示す。最適条件 2 の利得と本実験の結果から得た利得の推定値の差は $\pm 30\%$ の範囲内を超えていたためこの実験の再現性は確認できなかった。しかし本実験と確認実験の結果の傾向は同様のものであった。

表 2-16 冷間鍛造金型摩耗量の利得の再現性確認

条件	推定値	確認値
	η	
最適条件2	11.377	7.959
比較条件	3.332	3.609
利得	8.045	4.350

2-4-3 焼なまし完了品の変形抵抗測定

焼なまし完了品の変形抵抗測定結果を図 2-39 に示す。またこの結果から得た最適条件 1 の利得を表 2-17 に示す。最適条件 1 の利得と本実験の結果から得た利得の推定値の差は $\pm 30\%$ の範囲内であったためこの実験は再現性があると言える。

焼なまし完了品圧縮試験結果(確認実験)

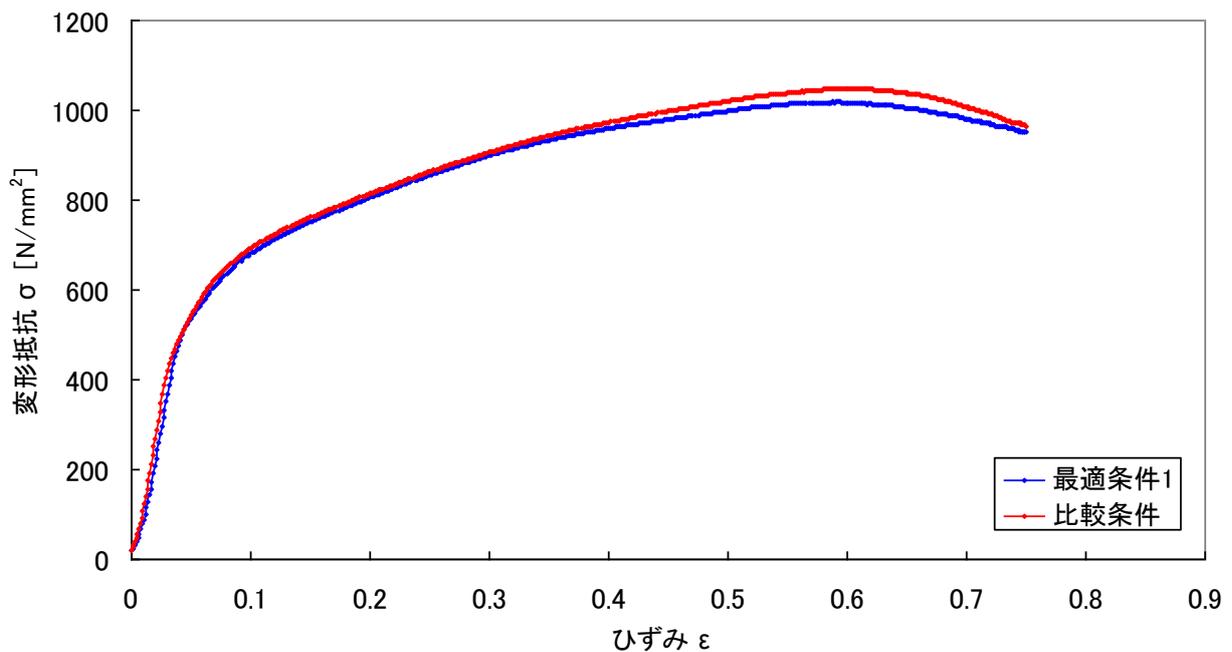


図 2-39 焼なまし完了品の変形抵抗-ひずみ線図 (確認実験)

表 2-17 焼なまし完了品変形抵抗の利得の再現性確認

条件	推定値	確認値
	η	
最適条件1	-59.052	-58.128
比較条件	-59.128	-58.215
利得	0.076	0.087

2-4-4 CR 工具の摩耗量測定

CR 工具摩耗量評価の確認実験から得られた最適条件 2 の利得を表 2-18 に示す。最適条件 2 の利得と本実験の結果から得た利得の推定値の差は±30%の範囲内を超えていたためこの実験の再現性は確認できなかった。

表 2-18 冷間鍛造金型摩耗量の利得の再現性確認

条件	推定値	確認値
	η	
最適条件2	-0.181	-7.150
比較条件	-9.078	-9.539
利得	8.897	2.389

2-4-5 切削刃具の摩耗量測定

使用後の切削刃具の二次電子像を図 2-40 に示す。この二次電子像の刃具摩耗量を測定しその結果から得られた最適条件 1 の利得を表 2-19 (a)に、最適条件 2 の利得を表 2-19 (b)に示す。最適条件 1、2 の利得と本実験の結果から得た利得の推定値の差は±30%の範囲内であったためこの実験は再現性があると言える。

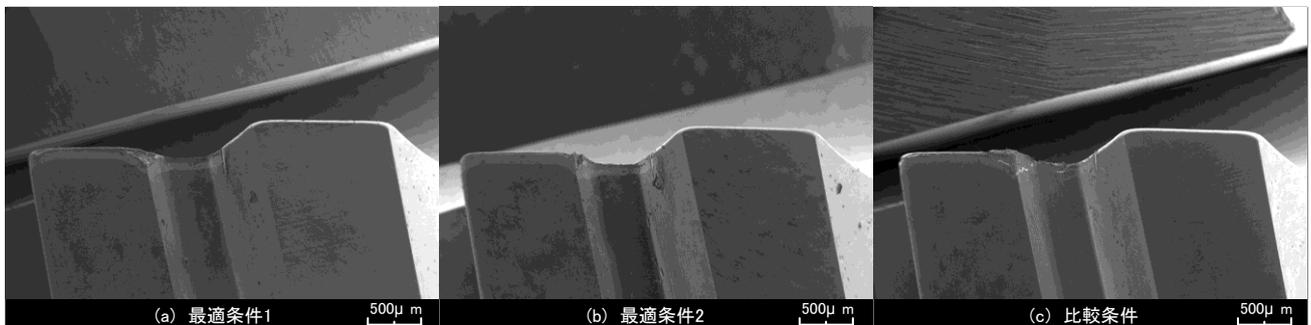


図 2-40 切削前後の刃具二次電子像（確認実験）

表 2-19 切削刃具摩耗量の利得の再現性確認

(a) 最適条件 1

(b) 最適条件 2

条件	推定値	確認値	条件	推定値	確認値
	η			η	
最適条件1	20.373	-37.123	最適条件2	20.730	-37.518
比較条件	17.975	-39.060	比較条件	18.875	-39.060
利得	2.398	1.938	利得	1.855	1.542

2-4-6 確認実験まとめ

以上の確認実験の結果から 2-3-13 で選定した 2 種類の最適条件のうち、信頼性が高いのは①鋼線の変形抵抗評価、③焼なまし完了品の変形抵抗評価、⑤切削刃具摩耗量評価で評価した最適条件 1 の方であった。以下の表 2-20 に最終的に選定した最適条件を示す。

表 2-20 最終選定最適条件

制御因子	最適条件
金型材質	REA35
金型コーティング	TiCN
Mn成分 [%]	0.25
Si成分 [%]	0.2
CR送り速度 [m/min]	8
CRワーク回転数 [min^{-1}]	85
CR送り圧力 [Pa]	6
焼なまし温度 [$^{\circ}\text{C}$]	550

2-5 コスト削減率の算定

今回比較条件とした SUJ2 材の製造条件から 2-4 で再現性が確認された最適条件 1 に変更してステンレス軸受を製造した場合に削減できる見込みのコストは 2-2-8 で示した式により計算すると冷間鍛造金型、CR 工具、切削刃具それぞれで以下の表 2-21 のようになった。これに切削加工から冷間鍛造、CR 加工に変更したことによる材料歩留まりおよび加工時間の改善、そして CR 製造条件の最適化を図ったことによる加工時間の改善を含めると、合計のコスト削減率は 11.1% となった。これは「SUJ2 軸受とステンレス軸受の価格比 1:3 を 1:2.5 へ下げる」つまりステンレス軸受の現状価格を 16.7% 低減させる目標値には届かなかったが、一定の成果が得られたと言える。

表 2-21 金型・工具・刃具コスト削減率

項目	冷間鍛造金型	CR工具	旋削刃具
利得	0.343	0.076	2.398
改善率	1.040	1.009	1.318
コスト削減率	3.88%	0.88%	24.13%

2-6 結言

本研究から得られた結果は以下の通りである。

- (1) 鋼線の変形抵抗は鋼線の Mn 成分が 0.45%、Si の成分が 0.05% のときに最も低く抑えられ、既存材より Mn、Si 成分を低減させることで冷間加工性の向上を図れることを確認した。
- (2) 焼なまし温度以外に焼なまし完了品の平面・断面硬さへ大きな影響を与える制御因子はなかった。
- (3) 焼なまし温度を高く設定することにより焼なまし完了品の変形抵抗を低減できることが確認できた。
- (4) CR 完了品の外径真円度を抑制させるためには CR 送り速度を上げる必要がある。
- (5) 切削刃具の摩耗量に最も大きく影響を与えているのは焼なまし温度であり、焼なましを実施しない方が摩耗量を抑えられるという結果となった。これは焼なましの次工程の CR によって加工硬化を起し、焼なまし温度による硬さの差が少なくなったため、また焼なまし温度 700°C では平均一次炭化物粒径が粗大化し、被削性を低下させているためだと考えられる。
- (6) 熱処理完了品の平面・断面硬さはいずれも工程能力 $C_{pk} \geq 1.33$ を満たしており、品質上の問題はなかった。
- (7) 確認実験での再現性評価の結果最適条件は金型材質：REA35、金型コーティング：TiCN、Mn 成分：0.25 [%]、Si 成分：0.20 [%]、CR 送り速度：8 [m/min]、CR ワーク回転数：85 [min^{-1}]、CR 送り圧力：6 [Pa]、焼なまし温度：550 [°C] となった。
- (8) 製造条件を最適条件に変更することで削減できる工具コストは冷間鍛造金型で 3.88%、CR 工具で 0.88%、切削刃具で 24.13% となった。これに切削加工から冷間鍛造、CR 加工に変更したことによる材料歩留まりおよび加工時間の改善等を加えると最終的に削減できる全体のコストは目標値の 16.7% には及ばないものの 11.1% となった。

第3章 総括

3-1 研究成果

本研究開発の成果として、タグチメソッドによる鋼線の材料成分、冷間鍛造金型の材質、コーティング、焼なまし温度、CR 送り速度、CR ワーク回転数、CR 送り圧力を評価、改善することにより目標値の 16.7%には及ばないものの、従来の製造方法より 11.1%のコスト削減が達成でき、品質も従来品と同等以上が得られることが知見された。従って本研究開発のメインテーマであるコスト削減の課題に対し、ステンレス鋼の鍛造・CR によるステンレス製品の生産技術の確立に一定のメドが立ったものと言える。

3-2 残された課題

本研究は鋼線～熱処理までのステンレス軸受製造における限られた範囲の製造工程を対象として実施、その工程についてそれぞれ最適条件を選定することを目的とし、タグチメソッドにより一定の評価は出来たものと認識しているが、当初目的とした最終形の加工方法の研究開発及び完成した軸受を用いて実施される製品の信頼性の試験（疲労試験、音響試験）までは実施できなかった。今後は今回得られた条件に基づく研究の継続により最終的に目標とする加工方法の確立と研削工程以降に及ぼす本加工方法による影響等についても様々なデータを採取、量産化に向けて確認して行くことが求められる。

また、今回の条件を更に狭めた実験を行い、真の最適条件を選定することが、事業化に向け必要である。

3-3 今後の展望

本事業による研究開発の結果、ステンレス製品の軸受製造におけるコスト低減、またフレキシブルな生産体制の確立による川下産業への量産品質の確保、安定供給に向けた取組みに関しては一つの道筋が開けたものと考ええる。

今後の事業化へ向けた課題としては、既に川下企業へ根付いてしまっているステンレス軸受は高価という印象を払拭、各環境への対応性、使用環境に優れていることによるメンテナンスコスト低減、如いては環境配慮型な軸受であるなどのステンレス軸受特有の優位性を前面に打ち出した情報の発信と共に川下企業のニーズを的確に捉えた中での積極的な販路拡大による事業化への取組みが不可欠と言える。

参考文献

- (1) 田中良平：ステンレス鋼の選び方・使い方,日本規格協会,(1996),P175
- (2) 井上清和 他：入門 パラメータ設計,日科技連,(2008),P122
- (3) 阿南吾郎 他：R&D 神戸製鋼技報,Vol.48, No.1,(Apr.1998),P39
- (4) 文献(2)の P114
- (5) 立林和夫 他：入門 タグチメソッド,日科技連,(2005),P27
- (6) 文献(2)の P80
- (7) 加藤隆：塑性と加工,日本塑性加工学会誌,第 30 卷,第 337 号,(1989),P152
- (8) 井上孝司 他：鉄と鋼,84,(1998),P387