

平成26年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「太径締結部品のマイクロ加工制御技術の確立」

研究開発成果等報告書

平成27年3月

委託者 東北経済産業局

委託先 公益財団法人福島県産業振興センター

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
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

1-3 成果概要

1-4 当該研究開発の連絡窓口

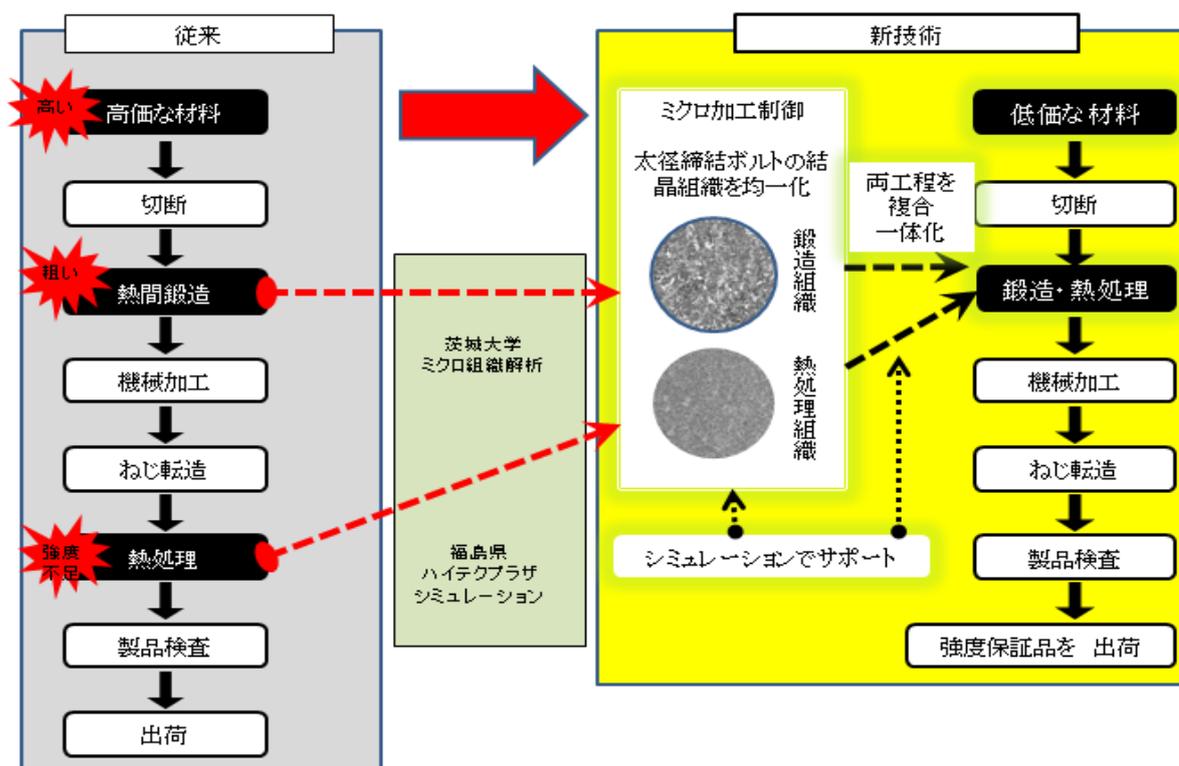
第2章 本論

最終章 全体総括

第1章 研究開発の概要

42φ以上の太径締結ボルトは、JISに規格がないために契約者間の協定で品質保証が交わされる。サイズが大きくなることから、焼入れ性の良いニッケル、クロムを多く含む高級素材を用いるが、実体での強度保証は極めて困難であり、受注の都度、個別の仕様に応じた各種の強度確認の試験を行い、不適合時には再製作対応で要求を満たすため、非常に高コストとなっている。

本研究開発では、①炭鉱部品メーカーとして長年培った鍛造および熱処理の匠の技術、②マイクロ組織の解析技術、③鍛造～熱処理の複合シミュレーション技術、の融合により、市場性のある低コストの材料を用い、品質の安定した製造技術の標準化により、安全性向上、25%の低コスト化を実現する。



課題
1. 材料費の低減が必要
2. 加工技術(鍛造、熱処理)の向上が必要
3. 温度変化に伴う組織の均一化が必要
4. 強度保証が必要
5. 再製作で納期が長い

本開発
1. 材料費が低減
2. 加工技術が向上(材料の性能低下をカバー)
3. 太径でも温度変化に伴いマイクロ組織を均一化
4. マイクロ組織と実体で強度保証
5. 再製作がなく、短納期化

目標値
①鍛造、熱処理の高精度化 3倍
②機械加工効率 2.5倍
③リードタイム 1/2
④材料費 1/2
⑤製品原価 2.5% DW
⑥国土交通省 認定取得

新事業へ参入
①風力発電向けボルト
②耐高熱性のプラント向けボルト
③世界企業へ販売
④航空・医療分野へ参入

太径締結ボルト (M42)



風力発電



1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(十七) 熱処理に係る技術に関する事項

1 熱処理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川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

「ア. 高機能化（高強度化・高精度化・高精密化・高耐久性化・安全性向上等）」

「エ. 低コスト化」

(八) 鍛造に係る技術に関する事項

1 鍛造に係る技術において達成すべき高度化目標

(3) ①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ 「ア. 高機能化」

「エ. 低コスト化」

(4) 川下分野特有の事項 2) 土木建設機械に関する事項

3) 重電機器に関する事項

現状、図 2-1 のように、大型プラント分野（水力、火力、風力、原子力発電、化学プラントなど）では、M42～M90 の太径締結ボルトは、イ)重電機器用とロ)耐高熱用に分けられ、JIS B 1051 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品 では、機械的性質はボルトのサイズが M36 までしか規定されていない。その理由は、自動車や建築などのボルト業界全体での需要量に比べ、当該業界の需要量が少ないことその他、さらに、①鍛造時に寸法の大きなバラツキ、②熱処理時に表面と内部での性質の大きなバラツキ、などへ技術的に対応が難しいためと考えられる。その結果、太径締結ボルトに関しては当事者間での契約に基づき、全数検査による精度確認や試験検査、試作・製品の作り直しなどを経て完成し、納入となるため、非常に高コストとなっている。

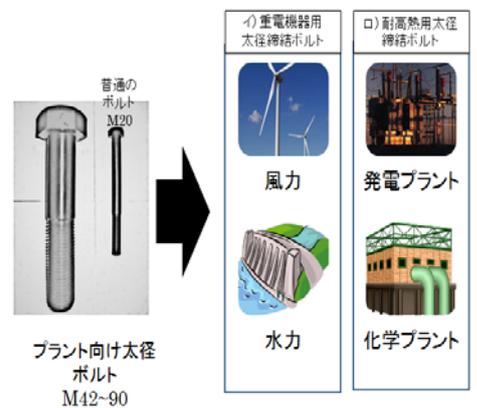


図 2-1

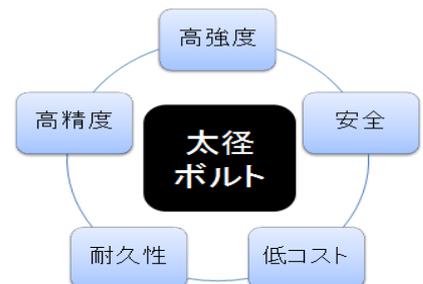


図 2-2 川下企業のニーズ

国内の大型プラントを製造する川下製造業者にとって、昨今の円高や後進国の技術力の向上に伴う世界的競争の激化により、太径締結ボルトにおいても高強度、高品質、安全性が高く、“低コスト”で調達することは我が国の国際競争力の強化のためにも極めて重要な課題となっている。

例えば、これらの太径締結ボルトは北極における石油採掘現場で用いられる大型クレーンなどにも用いられるが、世界的に見てもこの分野で高品質のボルトを生産できるメーカーはドイツ、アメリカ、イギリス、日本に限られ、さらに、日本においても当社を含めて3社のみである。ま

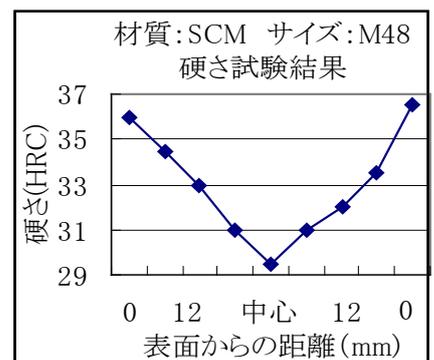


図 2-3 硬さ試験結果

た、水力発電、風力発電用のボルトにおいても同様のニーズがあり、使用する環境として高振動数、高速回転、かつ取り替えが非常に困難な場所で用いられるため、全数に対して非破壊検査を実施したものや折れ難いボルトなど、より高精度、高強度、高耐久性、そして安全性向上への要求が高まっている(図 2-2 参照)。

研究開発の高度化目標及び技術的目標値

(十七) 熱処理に係わる技術に関する事項

高度化目標 ウ. 作業性改善のための前後工程との連携技術の実現
力. 熱処理時間の短縮及び省エネルギー化

川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

ア. 高機能化(高強度化・高精度化・高精密化・高耐久性化・低フリクション化・安全性向上等)
エ. 低コスト化

解決すべき課題

本開発での目標値を達成するためには、以下の3点の解決すべき課題がある。詳細は後述する。

- 1.加工熱処理(TMCP)による組織制御、特性制御技術の開発
- 2.シミュレーション利用技術の開発
- 3.強度保証・品質保証技術の開発

技術的目標値

従来技術と本開発の目標値を表3-1 に示す。なお、本開発の目標の一つとして、国土交通省の鋼材等建築材料の性能評価の認定を受けることであるために、表3-1の※No.2~5 は「国土交通省 鋼材等建築材料の性能評価：風力発電用締結ボルトの品質確認項目」から引用したものである。

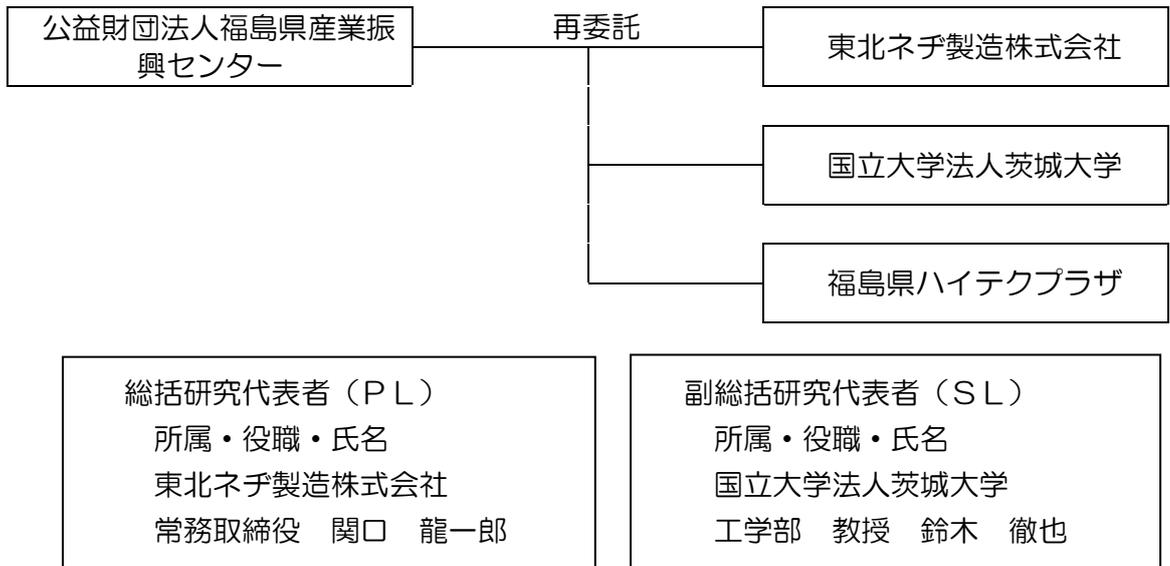
表 3-1 従来技術と本開発目標値

No.	項目	当社の従来技術	本開発の目標値
1	生産工程	鍛造、熱処理は別工程	熱間鍛造工程、熱処理工程複合一体化の加工 熱処理(TMCP)技術を太径締結ボルトに適用する。 【前後工程との連携・高機能化・低コスト化】
2※	太径締結ボルト 実体引張試験	実体試験無し	引張強さ:1,040MPa以上
3※	試験片の引張試験 0.2%耐力測定	表面部分は強度有り 内部は強度不足	太径締結ボルトの表面、内部共に、 引張強さ:1,040MPa以上、0.2%耐力:940MPa以上 とする。【高機能化】
4※	硬さ試験:表面と内部	硬度差HRC 6~9point	表面と内部の硬度差 HRC 3point以内とする。 【高機能化】
5※	機械的性質 (トルク係数値)	実体試験無し	トルク係数値 0.110~0.190 【高機能化】
6	鍛造精度 (寸法のバラツキ)	約1,500 μ m	500 μ m以内とし鍛造精度3倍にして鍛造時の 余肉(バリ)を削減し後加工の加工代、加工 時間を削減する。【高機能化・低コスト化】
7	リードタイム	90日	No.1生産工程、No.6鍛造精度を実現することにより リードタイム45日以内とする。【低コスト化】
8	マイクロ組織解析	当該評価技術無し	強度保証、品質保証技術を開発する為に 科学的根拠に基づき評価する。
9	シミュレーション技術	当該技術無し	加工熱処理(TMCP)技術にシミュレーション利用技術を開発し 組織、特性予測および処理条件を確立する。

1-2 研究体制

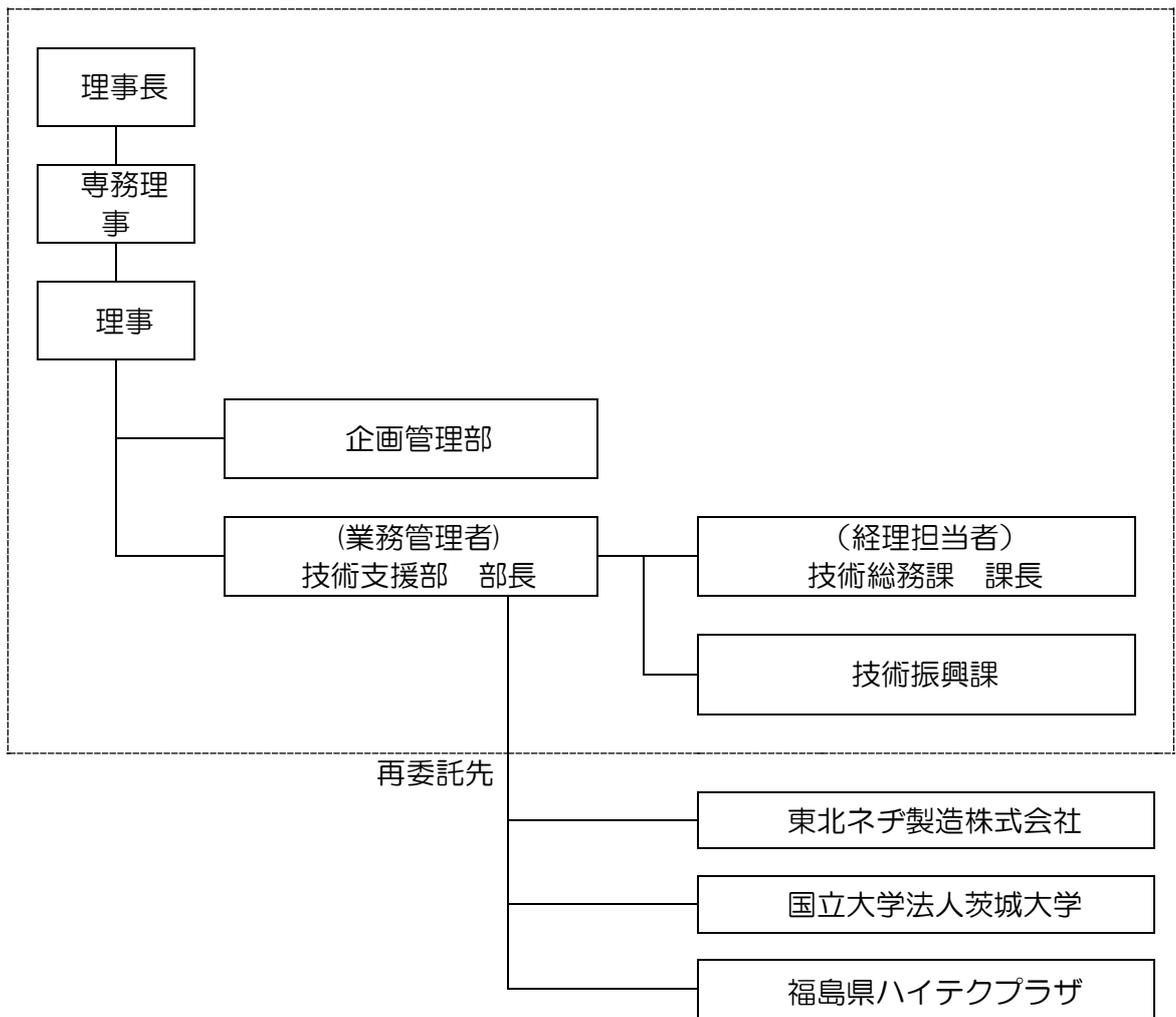
(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）

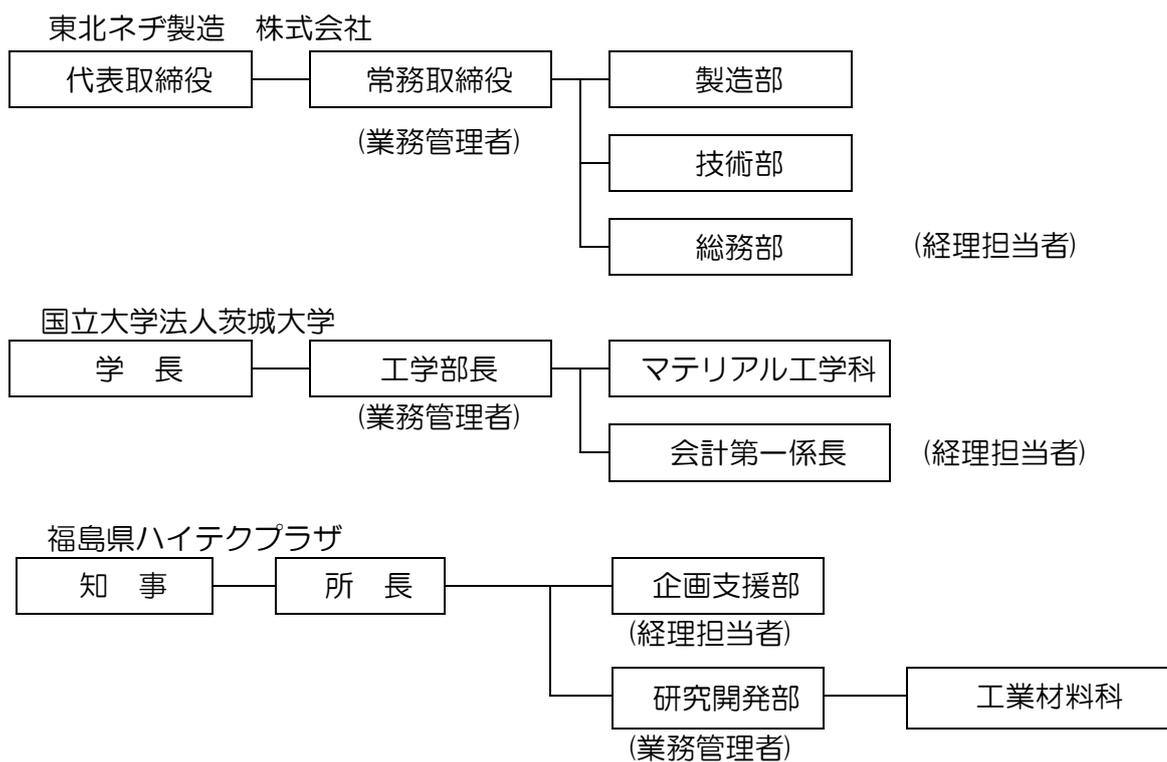


2) 管理体制

① 事業管理機関 [公益財団法人福島県産業振興センター]



②（再委託先）



(2) 研究員及び管理員（役職・実施内容別担当）

【事業管理機関】公益財団法人福島県産業振興センター技術支援部
管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
栗花 信介	技術支援部 部長	【4-1】【4-2】【4-3】 【4-4】
市川 俊基	技術支援部 技術振興課 上席主任	【4-1】【4-2】【4-3】 【4-4】
二瓶 亜希子	技術支援部 技術振興課	【4-1】【4-2】【4-3】 【4-4】

【再委託先（研究員）】

東北ネ子製造株式会社

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
関口 龍一郎	常務取締役	PL【1-1】【2-1】 【3-1】【3-4】
江幡 卓典	製造部部长	【1-1】【1-2】【3-1】 【3-2】【3-4】
白河 雅彦	技術部部长	【1-1】【1-2】【3-1】 【3-2】【3-4】
八巻 秀之	東京営業所所長	【1-1】【1-2】【3-1】 【3-4】
根内 英伸	販売部次長	【3-1】【3-4】
鈴木 克也	製造部課長	【1-1】【1-2】【3-1】【3-2】 【3-4】
塩沼 俊雪	技術部課長	【1-1】【1-2】【3-1】【3-2】 【3-4】
佐藤 広幸	技術部員	【3-1】【3-2】
渡辺 佑亮	技術部員	【3-1】【3-2】【3-4】

国立大学法人茨城大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
鈴木 徹也	工学部 教授	SL【1-1】【1-2】【2-1】 【3-2】
永野 隆敏	国立大学法人茨城大学工学部 講師	【1-2】【2-1】【3-2】

福島県ハイテクプラザ

氏名	役職・所属	実施内容（番号）
工藤 弘行	技術開発部工業材料科 主任研究員	【2-1】
光井 啓	技術開発部工業材料科 主任研究員	【1-1】，【1-2】
五十嵐雄大	技術開発部工業材料科 研究員	【3-2】
伊藤 弘康	技術開発部工業材料科 研究員	【1-2】
小柴 佳子	技術開発部工業材料科 研究員	【1-2】

(3) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

研究推進会議 委員

氏名	所属・役職	備考
関口 龍一郎	東北ネチ製造株式会社 常務取締役	PL
江幡 卓典	東北ネチ製造株式会社 製造部部長	
白河 雅彦	東北ネチ製造株式会社 技術部部長	
八巻 秀之	東北ネチ製造株式会社 東京営業所所長	
根内 英伸	東北ネチ製造株式会社 販売部次長	
鈴木 克也	東北ネチ製造株式会社 製造部課長	
塩沼 俊雪	東北ネチ製造株式会社 技術部課長	
佐藤 広幸	東北ネチ製造株式会社 技術部員	
渡辺 佑亮	東北ネチ製造株式会社 技術部員	
鈴木 徹也	国立大学法人茨城大学工学部 教授	SL
永野 隆敏	国立大学法人茨城大学工学部 講師	
工藤 弘行	福島県ハイテクプラザ工業材料科 主任研究員	
光井 啓	福島県ハイテクプラザ工業材料科 主任研究員	
五十嵐 雄大	福島県ハイテクプラザ工業材料科 研究員	
伊藤 弘康	福島県ハイテクプラザ工業材料科 研究員	
小柴 佳子	福島県ハイテクプラザ工業材料科 研究員	
沼田 守	日揮株式会社 技術研究所 所長	アドバイザー
小針 利明	株式会社日立エンジニアリング・アンド・サービス (HES)	アドバイザー
新 直孝	朝日工業株式会社	アドバイザー
藤沼 良夫	株式会社常陽銀行	アドバイザー
木村 良三	オリエンタルエンジニアリング株式会社	アドバイザー
榎本 良夫	榎本機工株式会社	アドバイザー
進士 文雄	株式会社サンキューブ	アドバイザー

アドバイザー 氏名	主な指導・協力事項
沼田 守	事業展開支援、太径締結ボルトの評価
小針 利明	事業展開支援、試験方法の指導助言
新 直孝	素材レベルでの結晶組織の均一化
藤沼 良夫	経営支援、ビジネスマッチング
木村 良三	熱処理焼入れ時の冷却速度の高速化、攪拌方法の改良
榎本 良夫	鍛造加工時の加圧エネルギーの均一化
進士 文雄	鍛造加工方法の技術指導

1-3 成果概要

【1-1】加工熱処理(TMCP)技術による組織制御、特性制御技術の開発

加工熱処理(TMCP)技術の最適化

①目標

熱間鍛造において東北ネチ製造(株)が過去の経験から得た定性的データを定量化する。また、次項に記す【2-1】鍛造-熱処理 一体シミュレーションから得られる、素材に応じた加熱温度、加熱時間、鍛造変形率の条件を参考に、加圧力、加熱温度などを細かく制御できる装置を導入することで、実現性の高いサーボ駆動プレスと誘導加熱の条件を最適化し鍛造精度 500 μm 以内にする。

②成果

誘導加熱装置のコイルの巻数、電流値、時間およびサーボ駆動スクリュープレスの加圧位置、加圧速度、熱間鍛造開始温度、熱間鍛造終了温度などの加工条件に基づき、材質、SCM435、SCM440、SNM439 を使用し複数の試料を製作し鍛造精度を測定した。目標である鍛造精度 500 μm 以内に対し鍛造精度 200 μm と実機を使用しての加工条件を確立した。

【1-2】金属のミクロ組織解析および組織形成予測による熱処理条件の妥当性検証

①目標

【2-1】鍛造-熱処理 一体シミュレーションによる組織・特性予測と【1-1】加工熱処理(TMCP)技術による組織制御、特性制御技術の開発で製造された試作品が同等組織か否かを確認し、加工条件が確かかどうかを評価する。

②成果

材質、SCM435、SCM440、SNM439 を使用し複数の試料を製作し組織観察を実施し評価した。最終的に実物の太径締結部品(サイズ M48)にて行い、SNM439 においては高強度の太径締結部品の加工が可能であることが判明した。材質 SCM440 についてはラボレベルでの試験を実施し加工熱処理技術での特性を評価した。

【2-1】鍛造-熱処理 一体シミュレーションによる組織・特性予測

①目標

本開発ではシミュレーションソフトを用い、熱間鍛造と熱処理を一続きとして、組織形成から機械的性質の予測までを解析する。また、シミュレーションでは素材の加熱温度、加熱時間、鍛造変形率(塑性加工)、加圧力、焼入れ時の温度及び冷却スピードの条件を導入し【1-2】金属のミクロ組織解析、内部応力解析の結果をシミュレーションヘフィードバックすることにより、より再現性の高い加工熱処理(TMCP)鍛造・熱処理のシミュレーション技術を確立する。

②成果

鍛造ならびに熱処理工程において必要な材料特性は、鍛造工程に関する熱間変形特性と、熱処理工程における熱変態特性である CCT 図の2つである。現状のシステムには実際の量産工程に活用するにはいくつかの課題があり本研究では、その課題を抽出し、解決手法を立案した。

【3-1】実体採取試験片による強度評価

①目標

本研究で対象とする M48 の太径締結部品の表面と内部から複数の 4 号試験片 (JIS に規定) を採取し、引張試験を行ない太径締結部品の強度評価を実施する。各部位におけるミクロ組織との関連性をデータで蓄積する。さらに、実物製品での品質保証を完全たるものにするために、大容量試験機 (3000kN 万能試験機を使用) を使用し、製品実物での引張試験を実施することで、同一生産ロット全体での強度保証、安全性向上を実現させる。

評価基準：実体引張試験、試験片引張試験共に、引張強さ 1,040MPa 以上

②成果

UT 検査器、PT 検査器を有効活用し、3000kN 万能試験機を使用し実体採取試験片の強度を評価した。最終的に SNCM439 48φについて実際の太径締結部品から実体と各部位 (表面・内部) から試験片を採取し引張試験、0.2%耐力、硬さ試験を実施し、実体引張試験、試験片引張試験共に、目標値である引張強さ 1,040MPa をクリアした。

【3-2】硬さによる強度保証技術

①目標

【1-1】、【1-2】で得られる各条件におけるサンプルに対し、ダイナミック微小部硬度計を用いて硬さ試験を行ない、ミクロ組織との関連性を分析することで、【3-1】の引張強度評価に加えて、硬さによる強度保証技術を確立し、一層の安全性向上を図る。

②成果

ダイナミック微小部硬度計を用いて焼入れ状態でナノスケール硬さ測定を実施し有効性の知見を獲得した。

【3-3】強度保証技術の高度化

①目標

高強度、高耐久性化、安全性向上のニーズに応えるため、ミクロ組織・強度の違いに着目した強度保証の高度化を図り更なる安全性向上を実現する。

②成果

製品化を目指す風力発電分野の要求を踏まえ「疲労特性」と「水素脆化特性（遅れ破壊特性）」に関して、その評価・試験方法に関する検討を行った。また、大臣認定取得のために実施した「ねじ切り」試験において、規格値をクリアできない状況が確認されたため、類似性の高い「破壊じん性」試験として切欠き付き試験片を用いた強度試験に関しても追加検討を行った。検討の結果、太径締結部品においては、形状の特徴から切欠き付き試験片を用いた試験が適切であると判断し、3試験ともに共通性の高い手法を選定した。

【3-4】建築基準法第37条第二号の国土交通大臣の認定を取得

①目標

建築材料として使用される太径締結ボルトについて、製造業者は国土交通大臣の認定を取得が必要。上記【1-1】から【3-3】の開発で建築基準法に定められた性能を満たす製品を製作し国土交通大臣の認定を取得する。

引張強さ・0.2%耐力：1040MPa以上

硬さ：表面と内部の差 HRC 3ポイント以内

ねじ切り試験：ナット回転角度 900度以上

②成果

【1-2】金属のミクロ組織解析および組織形成予測による熱処理条件の妥当性検証および【3-1】実体採取試験片による強度評価で組織、硬さ、力学的特性で良い結果が得られた太径締結部品を用いて試験を実施し目標値である引張強さ・0.2%耐力：1040MPa以上および硬さ：表面と内部の差 HRC 3ポイント以内を達成した。また、ねじ切り試験においてはナットが900度以上回転してから太径締結部品が破断することと定められているが結果として約800度で破断し目標を達成できなかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

会社名： 東北ネチ製造株式会社
担当者名： 代表取締役社長 関口 龍一郎
電話： 0246-56-4751
FAX： 0246-56-4575
E-mail： r.sekiguchi@touhokunedi.com

第2章 本論

【1-1】加工熱処理(TMCP)技術による組織制御、特性制御技術の開発

誘導加熱装置のコイルの巻数、電流値、時間およびサーボ駆動スクリュープレスの加圧位置、加圧速度、熱間鍛造開始温度、熱間鍛造終了温度などの加工条件を材質、SCM435、SCM440、SNCM439 を使用し複数の試料を製作し選定した。(表 1-1-1 参照) 加熱加工制御装置に加え高周波加熱炉、サーボ駆動スクリュード駆動プレスを連動させ実機を使用しての基盤を確立し、目標である鍛造精度 $500\mu\text{m}$ 以内に対し $200\mu\text{m}$ にすることが可能となった。

【1-2】金属のミクロ組織解析および組織形成予測による熱処理条件の妥当性検証

材質 SCM435、SCM440、SNCM439 を用いて太径締結部品(図 1-2-1)に加工し熱処理(調質)を行った。熱処理条件は、焼入れ温度と焼戻し温度について各々条件を振り分け処理した。組織観察、硬さ試験および【3-1】実体力学的強度と部分的力学強度を比較した。

材質 SNCM439 に関して組織観察の結果、軸部表面だけではなく軸部芯部まで全ての部分において焼戻しマルテンサイトになっており緻密な組織を得ることが可能である。(図 1-2-2、図 1-2-3 参照)。

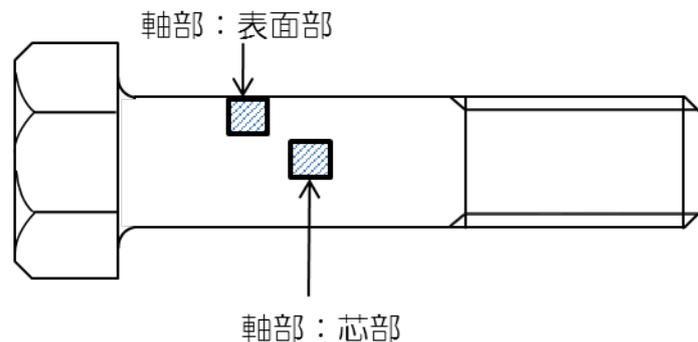


図 1-2-1 組織観察位置

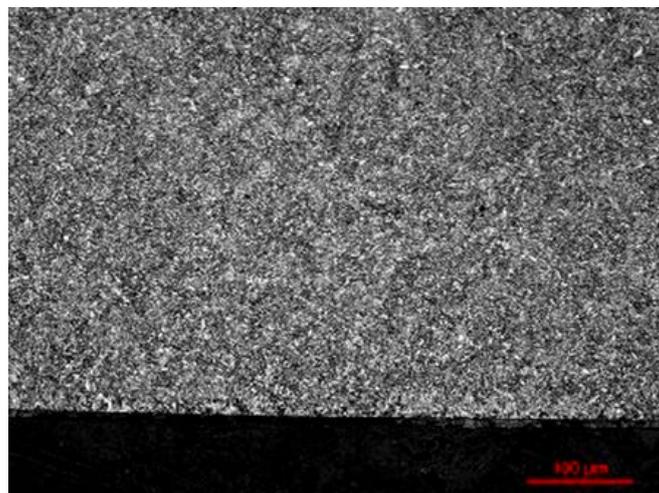


図 1-2-2 軸部表面

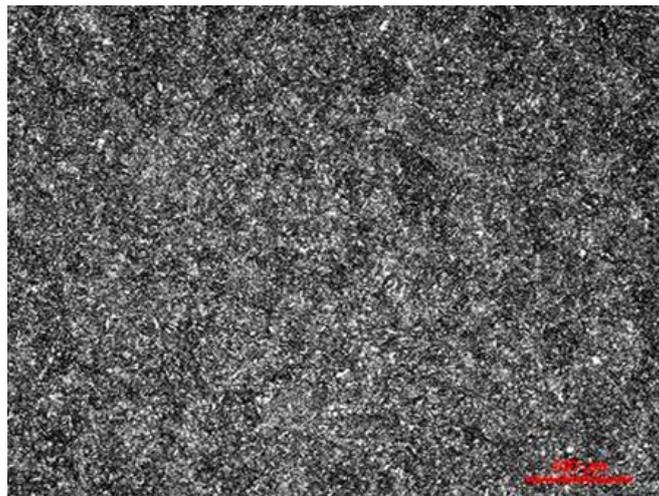


図 1-2-3 軸部芯部

【2-1】 鍛造-熱処理一体シミュレーションによる組織・特性予測

本研究開発では、鍛造、熱処理により得られる組織を予測する「組織予測」と、その組織により、どのような機械的特性が発現されるかを予測する「特性予測」を実現するシミュレーション技術として、鍛造-熱処理一体シミュレーションを利用する。25年度に、鍛造熱処理一体 CAE システムとして「Simufact.forming」を導入し、太径締結製品の熱間鍛造ならびに熱処理工程に関する計算を行った。26年度は、解析精度向上のために必要な技術として、焼入れ挙動の観察や、組織からの材料特性予測技術について検討した。

加工熱処理に対応可能な CAE システム

本研究で提案する「鍛造-熱処理一体 CAE」技術は、同一ソフトで前工程の解析結果を引き継いで計算するため、計算開始時点で組織や特性、残留応力状態が部位ごとに異なる状況を反映することが可能で高精度の解析を実現できる。

図2-1に CAE システムのフローチャートを記載する。「鍛造 - 熱処理一体 CAE」は、①鍛造・熱処理、②組織予測、特性予測の2つのプロセスからなる。前半の①鍛造・熱処理の解析では、構造解析と熱伝導解析に相変態解析も加えたもので、金型、被加工材の形状、材料特性、鍛造モーション、冷却条件などを入力し、変形や熱履歴を算出する。後半の②組織予測、特性予測では、①で計算された熱履歴と相変態特性を表す CCT 図から、どのような組織が得られ、最終的にどのような強度特性を発現するかの予測を行うことが可能である。

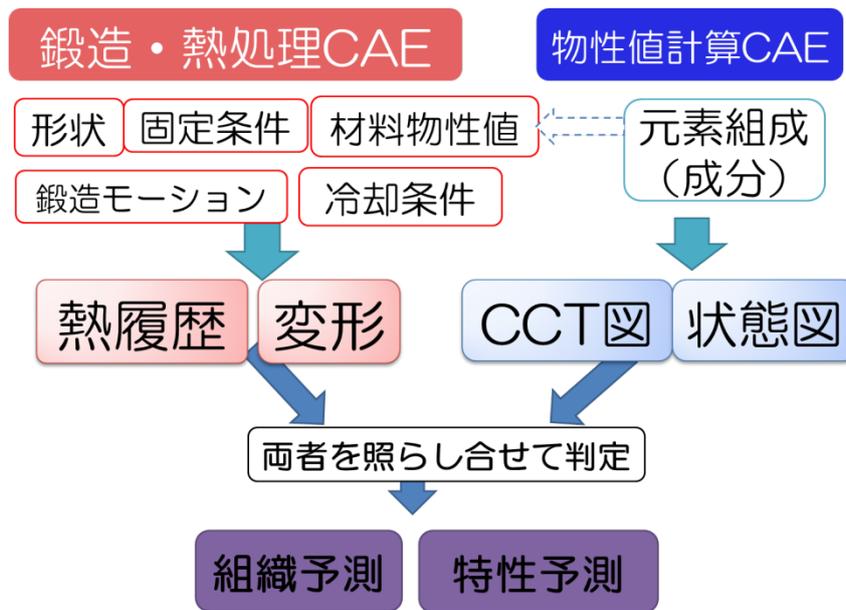


図2-1 本研究で導入した CAE システムのフローチャート

【3-1】 実体採取試験片による強度評価

【1-2】 金属のマイクロ組織解析および組織形成予測による熱処理条件の妥当性検証に用いた太径締結部品から実体採取試験片と部位ごとに採取した試験片を作成し引張試験を実施し力学的強度を比較した。部位採取試験結果および実体採取試験結果により目標値としている引張強さ $1,040\text{N/mm}^2$ 以上、0.2%耐力 940N/mm^2 以上をクリアした。【1-2】 金属のマイクロ組織解析および組織形成予測による熱処理条件の妥当性検証での組織観察および硬さ試験結果においても太径締結部品の表面、内部において差はほとんど見受けられていない。よって SNCM439 の場合、表面と内部硬さの差がロックウェル硬さ1ポイント以内であれば実体採取試験のみで太径締結部品の力学的強度を安易に評価することが可能である。

【3-2】 硬さによる強度保証技術の高度化

微小硬さ測定に基づく特性予測

H24 年度に導入したダイナミック硬度計を用いて旧オーステナイト粒界上、粒界近傍および粒内について硬さ試験を実施した。試験結果を表 3-2-1 に示す。粒界上よりも粒内の方が硬さが高くなるという結果が得られた。塑性変形が加わった場合には粒界近傍から加工硬化が促進されると考えられるが、この場合は粒内と差のない結果となった。また、粒界上での測定ではやや硬さが小さい結果となった。結晶粒界近傍における欠陥の量が微小硬さに影響したものと考えられる。

表 3-2-1 ダイナミック硬度計試験結果〔単位：HV〕

粒界上	粒界近傍	粒内
524	636	644

【3-3】強度保証技術の高度化

本項目では、強度保証技術の高度化として、製品化を目指す風力発電分野の要求を踏まえ「疲労特性」と「水素脆化特性（遅れ破壊特性）」に関して、その評価・試験方法に関する検討を行った。また、大臣認定取得のために実施した「ねじ切り」試験において、規格値をクリアできない状況が確認されたため、類似性の高い「破壊じん性」試験として切欠き付き試験片を用いた強度試験に関する追加検討を行った。検討の結果、ボルトにおいては、形状の特徴から 切欠き付き試験片を用いた試験 が適切であると判断し、3 試験ともに共通性の高い手法を選定した。また、画像処理によるひずみ測定 を併用する手法も追加検討した。筆者らが実施する研究で、破壊じん性の評価として、切欠き先端付近の塑性変形が大きく進行した「塑性域」の広がる様子を直接観察できる「画像処理によるひずみ分布測定」による評価が有効であるとの成果が得られている。

疲労試験については、東北ネチ製造(株)とハイテックプラザで共同研究を行い、振動試験を用い、共振現象を利用して短時間で疲労試験を行う技術を開発済みである。この手法を用いれば、通常の疲労試験機より 10 倍の 1 以下の短時間で試験を実施することができる。

遅れ破壊評価試験として、φ48 丸棒材に焼入れ焼き戻し処理を行った供試体から、ボルトの谷底に相当する位置から試験片を採取した「切欠き曲げ試験」を選定した。切欠きはなるべくボルトの谷底に近い位置になるように、断面が 5×5 ～ 10×10 mm 程度の角柱試験片を採取した。

大臣認定取得のために実施した「ねじ切り」試験は、締結ボルトの頭部を固定し、ナットに 900 度（2 回転半）の回転を与えて破断しないことを確認する試験である。この試験にて、規格値をなかなかクリアできない他、熱処理温度を 10℃ 変えただけで、破断回転角度が 100 度も変化する状況が確認された。

シミュレーションの結果、ねじ底の応力集中部での塑性変形の領域が徐々に広がり、隣り合うねじ底や中心部の塑性変形領域と合体して変形が進む様子を確認した。これらは、破壊力学に基づく「破壊じん性」試験に極めて近い。破壊じん性試験としては、コンパクト試験片や切欠き曲げ試験が知られており、切欠き付き試験片を用いた強度試験に関する追加検討を行った。

【3-4】建築基準法第 37 条第二号の国土交通大臣の認定を取得

試験供試体は【1-2】金属のミクロ組織解析および組織形成予測による熱処理条件の妥当性検証および【3-1】実体採取試験片による強度評価で組織、硬さ、力学的特性で良い結果が得られた太径締結部品を用いた。ねじ切り試験において試験規格値はナットが 900 度以上回転してから太径締結部品が破断することと定められているが結果として約 800 度で破断した。再度、

【3-3】強度保証技術の高度化に示したシミュレーションと強度評価技術を用いて試験を実施していく予定である。

最終章 全体総括

【1-1】加工熱処理(TMCP)技術による組織制御、特性制御技術の開発

本研究向けで新たに導入した装置を用いて、サーボ駆動スクリーブレス及び鍛造加熱装置の加工詳細条件を決定した。これまでは、属人的な加工方法だったものが、定量データによる加工となり、鍛造精度 500 μm 以内となる鍛造精度 200 μm と加工制御の基盤を確立した。

【1-2】金属のミクロ組織解析および組織形成予測による熱処理条件の妥当性検証

本研究開発で得られていた知見の実証のため、実物の太径締結部品 (M48) にて行い、低価格な SNCM439 においては高強度のボルトの加工が可能であることが判明した。

【2-1】鍛造-熱処理 一体シミュレーションによる組織・特性予測

鍛造ならびに熱処理工程において必要な材料特性は、鍛造工程に関する熱間変形特性と、熱処理工程における熱変態特性である CCT 図の2つである。現状のシステムには実際の量産工程に活用するにはいくつかの課題があり、本研究では、その課題を抽出し、解決手法を立案した。

【3-1】実体採取試験片による強度評価

SNCM439 48 ϕ について実際の太径締結部品から実体と各部位 (表面・内部) から試験片を採取し引張試験、0.2%耐力、硬さ試験を実施し、組織とともに評価を実施した。

【3-2】硬さによる強度保証技術

ダイナミック微小部硬度計を用いて SCM440 焼入れ状態でナノスケール硬さ測定を実施し有効性の知見を獲得できた。

【3-3】強度保証技術の高度化

製品化を目指す風力発電分野の要求を踏まえ 「疲労特性」と 「水素脆化特性

（遅れ破壊特性）」に関して、その評価・試験方法に関する検討を行った。また、大臣認定取得のために実施した「ねじ切り」試験において、規格値をクリアできない状況が確認されたため、類似性の高い「破壊じん性」試験として切欠き付き試験片を用いた強度試験に関する追加検討を行った。検討の結果、太径締結部品においては、形状の特徴から 切欠き付き試験片を用いた試験 が適切であると判断し、3 試験ともに共通性の高い手法を選定した。

【3-4】 建築基準法第 37 条第二号の国土交通大臣の認定を取得
認定取得に関し、太径締結部品（サイズ M48）のねじ切り試験を実施するには大容量の試験機が必要であり試験設備を利用し試験を実施することが可能となった。

（2）研究開発後の課題

熱間鍛造—熱処理複合一体による加工制御について、目標とする SCM440、SNCM439 での実現可能性が高いことが判明した。課題は、材料メーカー、材料ロットごとに異なる化学成分を、シミュレーションの活用により微調整し、加工制御を確立させることである。また、加工熱処理(TMCP)技術に関して、実際の量産を視野に入れた研究開発を行うことである。

（3）事業化に向けた取り組み

エンドユーザーとの定期的な接触を続け、最新の業界動向を常に把握する。情報収集、研究報告のために、再生可能エネルギー、プラント分野など関連展示会へ積極的に参加する。事業終了後(H27)から計画通りの販売を目標に、研究開発と同時に営業展開を進める。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。