

平成 24 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「自動車産業における生産技術の高度化に対応した  
産業ロボット用硬さ試験グリッパの開発」

研究開発成果等報告書

平成 25 年 3 月

委託者 東北経済産業局

委託先 財団法人本荘由利産業科学技術振興財団



# 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
1-2 研究体制 .....	6
1-3 成果概要 .....	9
1-4 当該プロジェクト連絡窓口 .....	10

## 第 2 章 研究内容及び成果

2-1 産業ロボットが可搬できる形状，重量を有する”硬さセンサ”の開発 .....	11
2-1-1 電動型ロックウェル硬さ試験機の開発 .....	11
2-1-2 硬さ試験グリッパの開発 .....	15
2-2 標準の”硬さ試験機”と同等の検査精度の実現のための補正技術の開発 .....	18
2-3 硬さ計測のための周辺技術の開発 .....	21
2-4 硬さの計測環境を整えるための制御手法の確立 .....	23

## 第 3 章 全体総括

3-1 全体総括 .....	28
----------------	----

## 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) 研究開発の目的

自動車産業では、グローバル化が急速に進展しており、素材や部品において生産国の多様化に付随し、品質の保証やトレーサビリティ(Traceability)など信頼性の確保が懸念され始めている。今までの自動車産業では、あるロット単位における抜き取り検査が一般的であったが、加工や組み立てなど様々な生産工程において、インラインによる基幹部品の全数検査が必要となり始めている。

特に車体に係る構造部品(シャーシやバンパーなど)や駆動や伝達系の係る(エンジンのシリンダブロック、ミッション内の歯車やプロペラシャフトなど)主要な構造部品において、適用材の材質や熱処理後の”硬さ”評価は、強度を保証する上でも非常に重要な検査項目となっている。しかし一般的に自動車部品の形状は複雑であり、JIS や ISO に準拠する”硬さ試験”では測定表面の平坦度や面粗さが厳しく規定されているので、従来からの試験方法に則って試験する場合には、各々の試験対象部品から試験片を切り出し、表面を加工してから”硬さ試験”を行っていた。そのために試験片が切り出された部品そのものは不良品になってしまうので、実質抜き取り検査以外の方法は考え難く、抜き取り試験に寄与される部品による損失も検査工程の作業コストを含めて大きな負担となっていた。

また車体溶接部や組み立て工程の中に”硬さ試験”を組み込む場合には、3次元空間内の任意に位置で計測する必要があり、当然、既存の検査方法では対応できない。自動車産業において、生産の効率化や品質向上のため、プレス、スポット溶接、塗装や内装組立て等のラインにおいて、多くの産業ロボットが適用されている。例えば、スポットガンをハンドリングするスポット溶接の工程では、複雑な車体形状に合わせてロボットアームの先端に取り付けられたスポットガンを目的の位置に持ち込んで、あらゆる場所のスポット溶接の作業を行っている。この技術の延長上で、多用な部品形状に合わせて”硬さ試験”も容易に行えるように思われるが、産業ロボットが可搬できるグリッパに適した形状や重量を満足しながら”硬さ”を測定できるような試験機やセンサは存在していない。また様々な表面状態を有する測定面に対応し、また重力場に対して任意の方向に応力を加えながら”硬さ”そのものの精度を保証する試験技術そのものも確立してはいない。そのため産業ロボットへの搭載に対応し、自動車生産ラインへの組み込み可能な”硬さ試験”の実用化を目的に研究開発を行う。

#### 2) 研究の概要

硬さ試験は、自動車産業におけるバンパー、シリンダブロックや歯車などの品質保証において構造や機構部品の基本的な材料試験であるが、従来の試験方法では試験片を作成して行うため、生産ラインに組み込むことや複雑な形状や任意の空間位置の部材に対して”硬さ”を測ることはできなかった。一方、自動車産業では、生産国の多様化による品質のバラツキを抑えるため、生産ラインで様々な形状部品に対応した硬さ試験が望まれている。本研究開発では、自動車産業の高度化及び品質管理を向上することを目的とし、産業ロボットのグリッパ用に”硬さ試験機”の技術を応用し、自動車部品の全数を生産ライン上で検査する”硬さセンサ”と”低侵襲で高精度な計測技術”の実用化を図るため、以下に示す内容について研究を行う。

① 産業ロボットが可搬できる形状、重量を有する“硬さセンサ”の開発

平成 22 年度は、推力発生機構の開発、荷重機構部の開発を行い、ロボット用試験グリッパ 1 号機的设计・製作・評価を行う。本機は川下ユーザーが硬さスケールを HRC スケール(圧子：ダイヤモンド、試験力：150kgf)で検討しているため、ロックウェル式の電動型の硬さ試験装置を製作する。駆動部には AC サーボモータ、ボールネジ、ロードセル、変位センサを用いて 1500N を負荷する構造とし、荷重軸に配した PZT アクチュエータにより荷重制御を行う構造とする。また硬さ試験グリッパに最適なひずみ量の少ない荷重センサの開発を行う準備を始める。

平成 23 年度は、ロボット用試験グリッパ 1 号機を基に産業ロボットのアームに組み込み可能な構造のロボット用試験グリッパ 2 号機的设计・製作・評価を行う。また硬さ試験グリッパに最適な荷重センサ及び変位センサの開発、産業用ロボットに組み込んだ際に試料面に対しての荷重軸の垂直を補正するアライメント機構の開発を行う。単体評価後は川下ユーザーにて試験評価を行い、次年度以降の開発に反映させる。

平成 24 年度は、ロボット用試験グリッパ 2 号機で得られた結果を基に実用化を考慮し、ロボット用試験グリッパ 3 号機的设计・製作・評価、及び硬さ試験グリッパの低侵襲化の検討を行う。ロボット用試験グリッパ 3 号機では、実用化において不可欠なコスト面も考慮し、荷重センサ、変位センサ等の電気部品についても最適化も同時に進める。

この研究開発において、達成すべき目標は以下の通り。

- ・ 1500N 以上の推力発生機構を軽量コンパクトな構造で実現する。

(最大試験荷重：1500N 以上、最小荷重分解能：1N 以下、本体重量：10kg 以下)

- ・ 重力の方向に拘束されず、任意の方向から荷重に対し正確な“硬さ”を計測できる機構を実現する。(重力方向以外の向きによる硬さ測定：JIS 許容値に対する誤差：±3%以内)

- ・ 様々な形状部品形状に倣いながら測定面に対して垂直、又は仕様の荷重方向においても正確な荷重を加えるアライメント機構を実現する。

(荷重方向アライメント補正許容量(対向する荷重ポイント間の許容ずれ量)：±5mm、荷重方向の許容角度：水平面に対して 180 度、対向する荷重ポイント(測定試料の底面と上面の荷重点)間の許容角度ずれ：±5 度以内)

- ・ 試料の厚さや複雑な形状に合わせながら、圧子部と測定対象との接触を自在に回避する大きなストロークを実現し大きな試験荷重を両立するための高剛性な機構を開発する。(圧子軸の可動ストローク 150mm 以上)

①-1 150mm 以上のストロークを有し、試料の厚さやロボット先端の回避動作を妨げない機構の開発(荷重機構部の開発)

①-2 1500N 以上の推力をコンパクトに発生する機構の開発(推力発生機構の開発)

①-3 10N~30KN まで正確に計測できる荷重センサの開発(荷重センサの開発)

①-4 硬さ試験の高精度化、低侵襲化を促進するため、複数の“硬さ試験”を複合化させる手法の確立

①-5 低侵襲で計測表面の状態に影響を受けない圧子の開発

①-6 荷重方向や姿勢の補正を行うための圧子部のアライメント機構の開発(圧子部アライメント機構の開発)

## ② 標準の“硬さ試験機”と同等の検査精度の実現のための補正技術の開発

平成 22 年度は、FEM によるシミュレーション技術を応用して、表面の凹凸や熱処理後の黒皮など表面状態や被覆条件を考慮した測定が実機上で可能かどうか検証し、補正方法の開発を行う。

平成 23 年度は、ロボット用試験グリッパ 2 号機を産業ロボットのアームに組み込んで“硬さ試験”を行う場合に不可欠な JIS 規格との整合性を得るための検証と補正方法の開発を行う。また FEM によるシミュレーションも導入しながら金属以外の弾性材や CFRP 等の複合材にも対応した硬さ測定方法の開発も合わせて行う。

平成 24 年度は、実用化に向けた試料表面状態の補正方法の開発を行う。また硬さ試験グリッパの低侵襲化を検証し、微小荷重から得られた微小なくぼみから硬さ値の真値を推定する手法の開発、及び荷重と変位のプロファイルから硬さの値を算定する弾性変形を応用した“押し込み型硬さ試験”の検討を行う。

この研究開発において、達成すべき目標は以下の通り。

- ・従来は鏡面が基本だった試料表面の状態に対して、熱処理など加工上がりの状態で正確な“硬さ”を計測する手法を確立する。

(鏡面状態以外の試料表面による硬さ測定：鏡面試料との比較測定誤差 $\pm 5\%$ 以内)

- ・様々な試料面の状況に合わせて“硬さ”を測るため、圧子部にレボルバー機構を搭載し、顕微鏡の観察倍率を変えるように試料表面の観察機能、磨き等の加工機能やくぼみの断面積の計測機能などを可能とし、ロックウェル試験に必要な荷重と押し込み量の計測を含め、多様な“硬さ試験”に付随した機能をグリッパ先端で実現する。

(“硬さ”の真値(JIS 許容値)に対する誤差： $\pm 3\%$ 以内)

- ②-1 表面の凹凸や熱処理後の黒皮など表面状態や被覆条件を考慮した補正方法の開発
- ②-2 金属以外の樹脂、ゴムなどの弾性材や CFRP などの複合材などにも対応した測定方法を確立する
- ②-3 低侵襲を図るため押し込み荷重を最小限に留め、得られた微小な圧痕から真値を推定する手法の開発
- ②-4 荷重を加えた時の応力と押し込み量の時間変化から、材料特性や複合の状態を推定する手法を確立する

## ③ 硬さ計測のための周辺技術の開発

平成 22 年度は、ロボット用試験グリッパ 1 号機を動作させるための駆動アンプ、ロードセルアンプの開発を行い、コントローラ的设计・製作を行う。ソフトウェアではロボット用試験グリッパ 1 号機を動作及び演算処理を行うアプリケーション及び PZT アクチュエータによる荷重制御を行う。

平成 23 年度は、より高精度の測定を行うために高速な演算処理が必要となるため、DSP を用いたコントローラの開発を行い、ロボット用試験グリッパ 1 号機用に開発した駆動アンプ、ロードセルアンプの改良、及び変位センサ用のアンプ開発を行う。ソフトウェアではロボット用試験グリッパ 2 号機用ソフトウェアの開発、及び低侵襲化を行った場合の画像処理プログラムの開発を行う。

平成 24 年度は、実用化を考慮したロボット用試験グリッパ 3 号機用のコントローラの設計・製作・評価、及びソフトウェアの開発を行う。

この研究開発において、達成すべき目標は以下の通り。

- ・ 3m 立方の空間内の任意の位置や姿勢、任意の荷重方向において、JIS 規格に準じた“硬さ試験”と同等に正確な“硬さ”を計測する手法を確立する。

(試験許容空間：3×3×3m 以上)

- ③-1 グリッパ部に組み込み可能なコンパクトで、高推力を発生する駆動回路の開発
- ③-2 グリッパ部に組み込み可能なコンパクトで、計測レンジが広く、分解能が高い荷重センサの計測用回路の開発
- ③-3 グリッパ部に組み込み可能なコンパクトで、スポット溶接機などが発生するノイズに対して大きな耐性を有するコントローラの開発
- ③-4 計測表面や凹凸、荷重後の圧痕状態を観察する“硬さ試験”に特化した画像システムの開発

#### ④ 硬さの計測環境を整えるための制御手法の確立

平成 22 年度は、昨年から製品化に取り組んでいる電動型ビッカース硬さ試験機を基に、硬さ試験グリッパに適した振動等の外乱振動を考慮する荷重制御の開発を行う。

平成 23 年度は、硬さ試験グリッパの姿勢を考慮した荷重制御方式の開発を行い、JIS 規格を満足する正確な荷重制御を実現する。また表面の凹凸や熱処理後の黒皮など表面状態の影響も排除する荷重制御の方式についても検討する。

平成 24 年度は、硬さ試験グリッパの改良に合わせた荷重制御について検討し、実用化を視野に入れながら、JIS 規格との整合性を検証する。また硬さ試験グリッパの低侵襲化を図るため、微小荷重を実現するための制御方法の確立や微小な押し込み量の計測方法の実現を図る。

この研究開発において、達成すべき目標は以下の通り。

- ・ “硬さ試験”に力制御を適用することで、材料の特性に合わせながら必要以上の応力が加わることを回避し、低侵襲でありながら精度の高い“硬さ試験”評価を実現する。

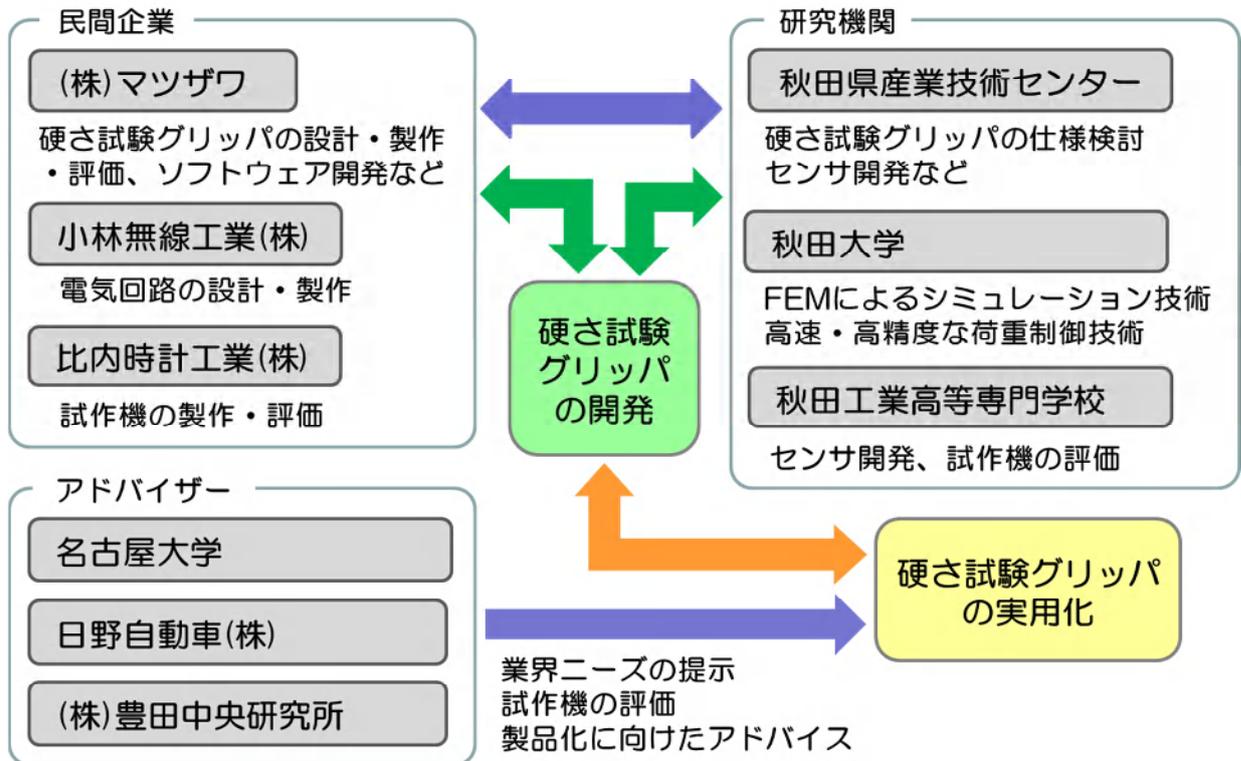
(“低侵襲モード”によるくぼみの体積比 (低侵襲モード/JIS 基準) : 1/10 以下)

- ・ “硬さ試験”の低侵襲化を図るために、FEM による構造解析を組み合わせた評価手法を確立し、微小荷重条件においても標準荷重条件と同様な結果が得られる計測法を実現する。(“低侵襲モード”による測定誤差 : ±7% 以内)

- ・ 金属以外の材料評価を行うため、“硬さ”以外に“弾性”，“粘性”について評価を行う。

- ④-1 振動などの外乱振動を考慮した荷重制御の開発及び荷重制御プログラムの開発
- ④-2 低侵襲を目的とし微小荷重や微小な押し込み量の計測方法及び制御方法を確立する
- ④-3 表面の凹凸状態や被覆条件に適応しながら、荷重を制御する手法を確立する
- ④-4 ロボット搭載に応じた重力補正、姿勢補正機能を有する荷重制御方式を確立する
- ④-5 荷重を加えるプロファイルをコントロールし、延性材、弾性材や脆性材など様々な工業材料の特性に合わせた“硬さ”を測るための荷重制御の手法を確立する

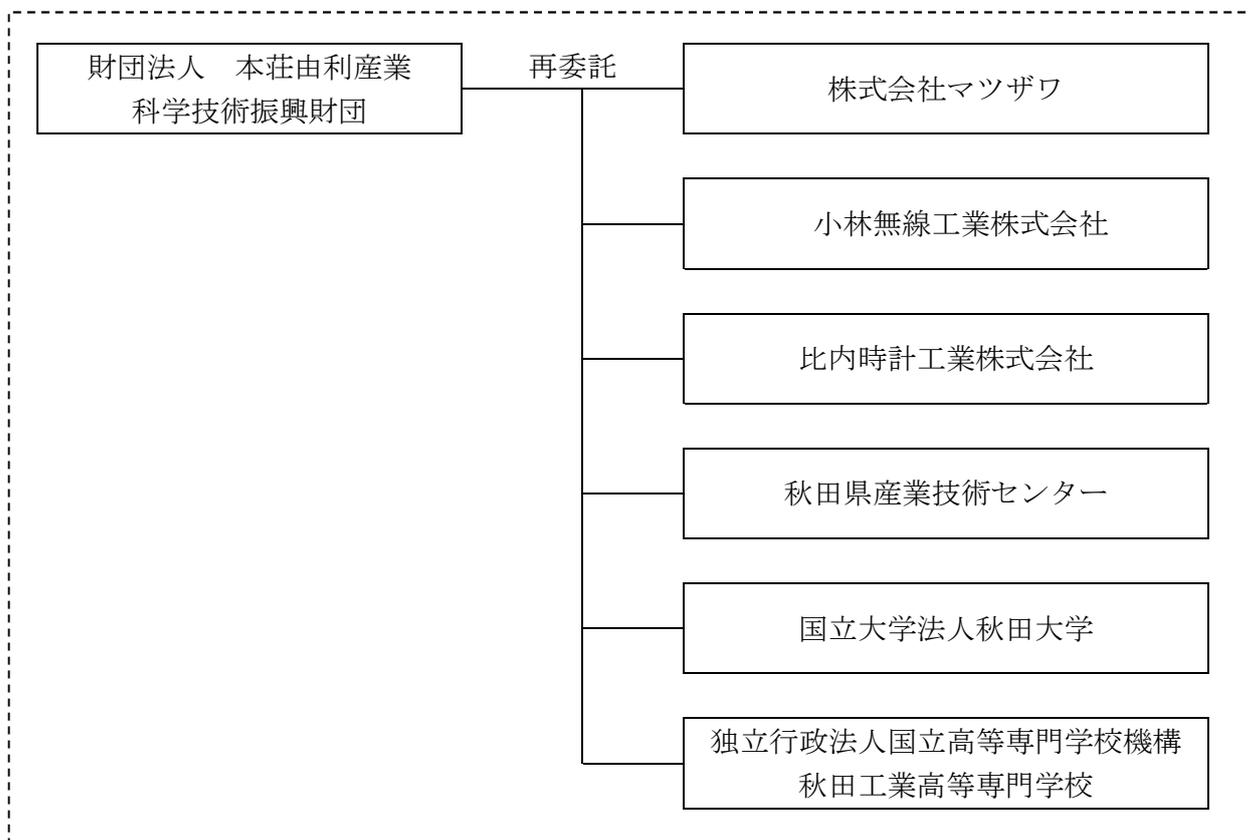
3)再委託先の役割分担及び連携図



1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織(全体)



総括研究代表者 (PL)  
株式会社マツザワ  
代表取締役社長  
安保 徹

副総括研究代表者 (SL)  
秋田県産業技術センター  
上席研究員  
森 英季

アドバイザー  
・日野自動車株式会社 車両生技部  
・株式会社豊田中央研究所 試作開発部  
・名古屋大学 エコトピア科学研究所

(2) 管理員及び研究員

1) 管理員

財団法人本荘由利産業科学技術振興財団

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
高橋 久夫	コーディネーター	
工藤 英也	事務局長補佐	

2) 研究員

株式会社マツザワ

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
安保 徹	代表取締役社長	
境屋 博司	技術課次長	2-1-1,2,3,4,5 2-2-1,2,3,4 2-3-1,2,3,4 2-4-2
飯塚 純平	技術課課長	2-3-4 2-4-2
戸嶋 邦貴	技術課	2-3-3 2-4-1,2,3,4,5

小林無線工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
高橋 悟	アクチュエータ担当課長	2-3-1,2,3
江藤 真人	製造課製造技術担当	2-1-1,2

比内時計工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
川田 勲	技術一課課長	2-1-1,2,4
小松田 武	技術二課	2-1-1,2,4

秋田県産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
森 英季	上席研究員	2-1-1,2,3,4,5,6 2-2-1,2,3,4 2-3-1,2,3,4 2-3-1,2,3,4
櫻田 陽	研究員	2-4-1,2,3,4,5

国立大学法人秋田大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
渋谷 嗣	工学資源学部 教授	2-1-4,6 2-2-1,2,3,4
長縄 明大	工学資源学部 教授	2-1-5 2-4-1,2,3,4,5

独立行政法人国立高等学校機構秋田工業高等専門学校

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
宮脇 和人	機械工学科 教授	2-1-1,2,3

### 1-3 成果概要

#### 【研究開発項目① 産業ロボットが可搬できる形状、重量を有する“硬さセンサ”の開発】

平成 22 年度は、川下企業である日野自動車(株)の工場ラインへ応用するため、150mm 以上のストロークを有し、試料の厚さやロボット先端の回避動作を妨げない機構の開発を前提とし、測定試料の上面を基準とする電動型の硬さ試験グリッパ試作 1 号機を従来技術をベースに発展させ開発した。川下企業と連携しながら開発を進める上で、現状の高張力鋼をホットプレスする工程では、工場内に据え置くロックウェル硬さ試験機の要求が潜在的にあることがわかり、グリッパの原型機を早期に実用化する上でも、また本事業の技術を早期に実用化する上でも必要不可欠と判断した。

平成 23 年度は、前年度の試作 1 号機を基本とする電動型のビッカース硬さ試験機とロックウェル硬さ試験機(TEST2011 model)を開発し、平成 23 年 10 月に開催された第 11 回総合試験機器展(TEST2011)に参考出展した。また同時に試作 1 号機の大幅な小型化を図るため空気シリンダ型の硬さ試験グリッパ試作 2 号機を開発し、産業ロボットへの搭載を前提とする“硬さセンサ”の実現のための足掛かりとした。

平成 24 年度は、制御性に優れた試作 1 号機と同様に電動型に戻しながら、小型で高剛性化を図るため、ステッピングモータとボールネジを直結せず、タイミングベルトで対向させながら動力伝達機構を有する電動型の硬さ試験グリッパ試作 3 号機の開発を行い、“硬さセンサ”としての実証実験を行った。またロックウェル硬さ試験機(TEST2011 model)の技術を応用発展させ自動車生産ラインで応用するため、試作 3 号機の機構と組み合わせ“硬さ試験グリッパ実証機”を開発した。1 月末に日野自動車(株)の本社工場内にて検証実験を行った結果、連続プレスやフォークリフトの大きな振動や騒音環境下において、正確な“硬さ測定”が安定して可能なことが確認できた。現在、川下企業からは「“硬さ試験グリッパ”を産業用ロボットに搭載する前段として、バランスと呼ばれる作業者をアシストするクレーンに可搬し、作業者が車体等の任意の場所にハンドリングし、任意の姿勢で“硬さ試験”できないか。」また「ホットプレス後の未加工表面でロックウェル硬さ試験に準拠した“硬さ測定”ができないか。」と 2 つの要求がある。本事業の中で試作 3 号機が任意の姿勢で正確にロックウェル硬さ試験が行えることは確認した。ホットプレス後の未加工表面の“硬さ”は試作 3 号機の初試験力を可変にすることとロックウェル C スケール硬さ(以下 HRC)の対比試験を厳密に行い、データベースを用いることで関連した評価手法の可能性が得られた。

#### 【研究開発項目② 標準の“硬さ試験機”と同等な検査精度の実現のための補正技術の開発】

JIS 規格に準拠した“硬さ試験”と同等な試験精度を自動車の生産ライン上で実現するため、平成 22 年度から引き続いて有限要素法(FEM)による構造解析を継続し、川下企業となる日野自動車(株)からサンプル試料(実際の生産ラインでホットプレスされた試料)の硬さ値や鉄系材料の引張り試験を基にシミュレーションの精度や、データのバラツキ、補正の効果を検証した。川下企業からは、ホットプレス後の未処理品(現在は圧子の押し付け面を作業者がグラインダーによって黒皮の除去を行っている。)に対応した HRC と等価な硬さ評価条件が求められており、初試験力を可変した“硬さ試験”のデータを実試料から取得し、FEM によるシミュレーション検証と組み合わせたインライン上で行える HRC に準拠した検査技術の確立を目指している。インライ

ン上の“硬さ試験”は、JIS または ISO に準拠した“硬さ”との相関や再現性は不可欠であるが、適用先毎に社内基準にカスタマイズする必要があり、川下企業のノウハウとなるものである。本事業の補正技術は、“硬さ試験”のインライン化に最も重要で基礎となるものであり、そのための固有技術が確立できるものとする。

#### 【研究開発項目③ 硬さ計測のための周辺技術の開発】

研究開発項目①の上面基準仕様である電動型の硬さ試験グリッパ試作 3 号機は、ステッピングモータの回転力をタイミングベルトを介してボールネジに伝達し、測定試料に圧子を押し付けた時の力を検出するロードセルをセンサとする荷重フィードバック系を構成されている。平成 24 年度は平成 23 年度の成果をベースにコントローラ、ドライバー、センサアンプを含む電気回路の設計開発を行った。開発された各要素は“硬さ試験グリッパ実証機”に組み込まれ、新たに開発されたインライン向け表示器と組み合わせることで、川下企業から要求されている設置型のインライン・ロックウェル硬さ試験機への要求を試験機としての精度を含めてクリアすることができた。新たに得られた開発成果は、第 12 回総合試験機器展(TEST2013)において確実な要素技術として結実するものとする。

#### 【研究開発項目④ 硬さの計測環境を整えるための制御手法の確立】

研究開発項目①の上面基準仕様の電動型ロックウェル硬さ試験機(TEST2011model)の荷重フィードバックや外部からの振動外乱を抑制する制御手法を平成 22 年度から継続して開発してきた。開発当初は、荷重フィードバック制御を行っているにも関わらず、除振性の高い材質のゴム足を試験機に装着しなければ外部振動を抑制することはできなかった。これは制御系設計の問題と言うよりもセンサ信号の分解能や重畳するノイズによる影響で、ハードに依存する部分が大半であった。研究開発項目③の改良によって、荷重信号の分解能の向上や信号のシリアル転送化によってノイズの重畳が抑制された。その結果、一般的な材質のゴム足を装着した状態でも自動車工場内の振動や騒音環境下で、JIS に規定された“硬さ試験機”の検定基準を十分満足できた。

コントローラの演算能力やハードに依存した制御限界など、課題はまだ多くあるが最終的に試験機の総合性能を司る部分でもあるので、第 12 回総合試験機器展(TEST2013)に向けた改善も含め、開発を進展させている。

#### 1-4 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人本荘由利産業科学技術振興財団

(最寄り駅：東日本旅客鉄道羽越本線羽後本荘駅)

〒015-0051 秋田県由利本荘市川口字大覚 182 番地

TEL : 0184-22-3488

FAX : 0184-23-7460

事務局長補佐 工藤 英也

## 第2章 研究内容及び成果

### 2-1 産業ロボットが可搬できる形状、重量を有する”硬さセンサ”の開発

#### 2-1-1 電動型ロックウェル硬さ試験機の開発

##### 1) 研究目的

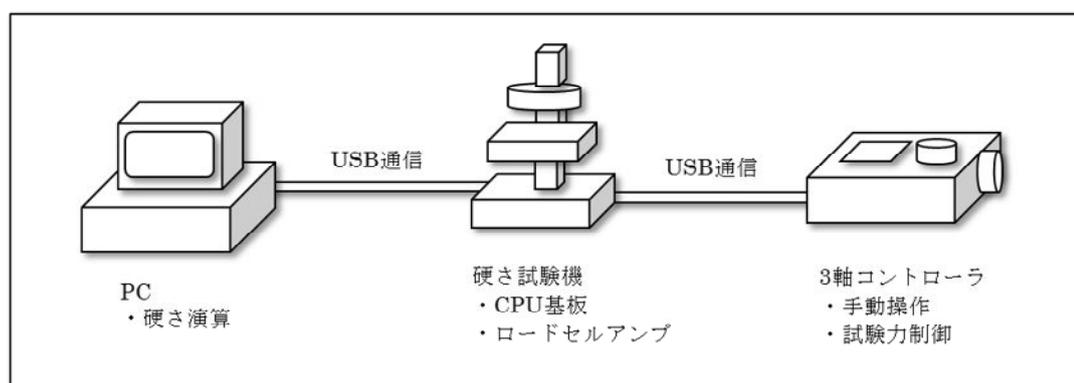
川下企業の測定対象物は表面に酸化被膜や凹凸があり、従来型のロックウェル硬さ試験機では試料の表面を加工しない限り内部硬さを正確に評価する事は出来ない。「硬さ試験グリッパ」の硬さ測定技術を確認するために、本研究で開発した「硬さ試験グリッパ試作1号機」及び「電動型ビッカース硬さ試験機」の構造を基に、上面基準仕様でステッピングモータとボールネジ駆動の「電動型ロックウェル硬さ試験機」の開発を行う。

##### 2) 研究内容

###### ① 「電動型ロックウェル硬さ試験機」の装置構成

川下企業の測定対象物について、試料表面の酸化被膜(黒皮)や凹凸を加工することなく、内部硬さを正確に評価するために、「電動型ビッカース硬さ試験機」及び「硬さ試験グリッパ試作1号機」の蓄積した技術を活かし、「電動型ロックウェル硬さ試験機」の開発を行った。本試験機は「電動型ビッカース硬さ試験機」のモータとボールネジを用いた荷重ヘッド部が昇降する荷重機構とする事で、本研究で開発した駆動回路やコントローラ等の電気回路の開発技術を応用する事が可能となる。

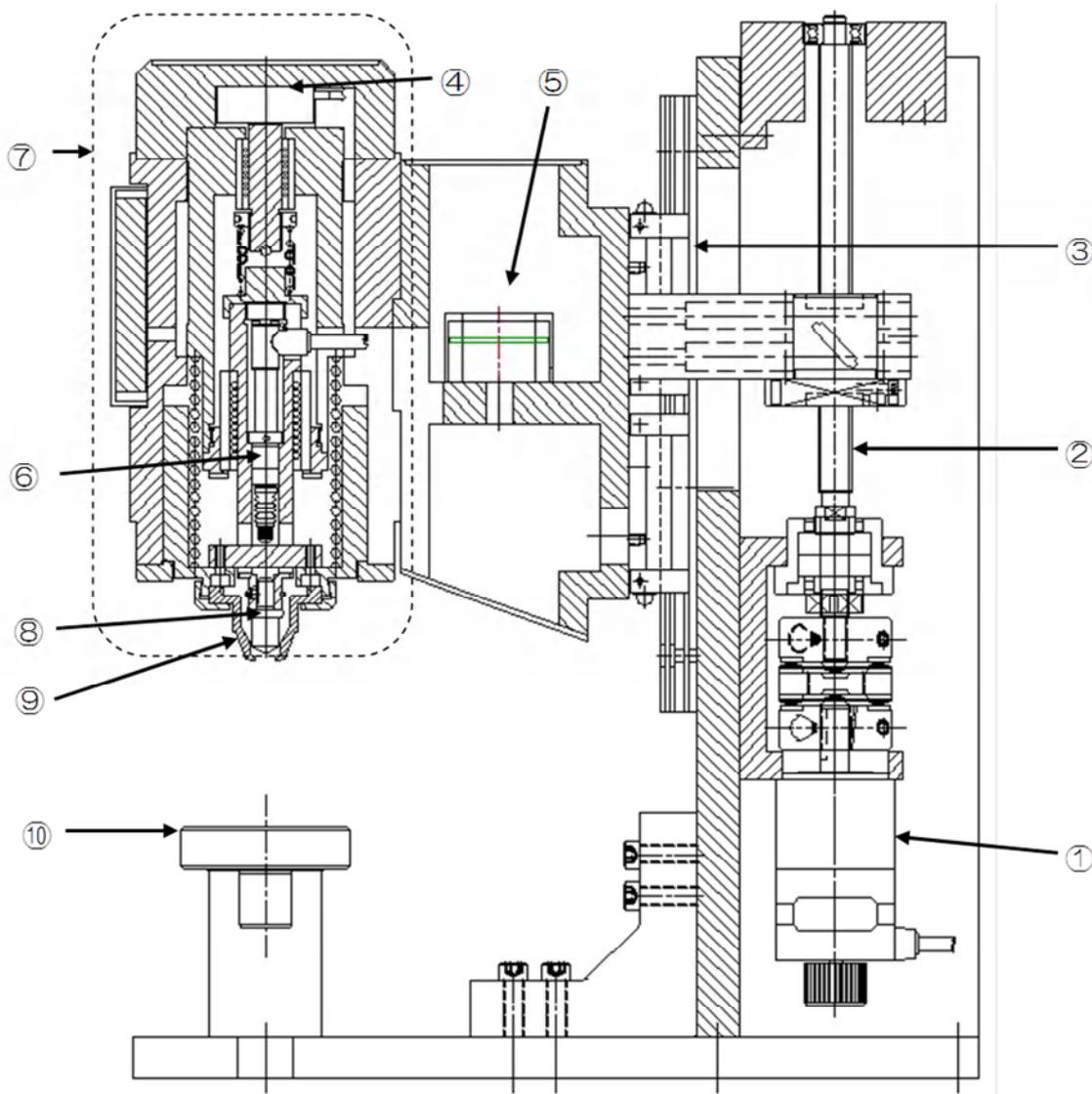
「電動型ロックウェル硬さ試験機」の装置構成を【図1】に示す。本試験機は「硬さ試験グリッパ試作1号機」及び「電動型ビッカース硬さ試験機」の構造を基に上面基準測定機能を加え、硬さ評価技術の高度化を行った。また、開発コンセプトとしてTEST2011への出展を行うため製品化を考慮した斬新なデザイン、及び「硬さ試験グリッパ」への展開を考慮した軽量・コンパクトな形状を目標にした。



【図1 電動型ロックウェル硬さ試験機の構成】

② 「電動型ロックウェル硬さ試験機」の設計

本研究で開発した「電動型ロックウェル硬さ試験機」の構造(実験用の仮フレームに搭載)を【図2】に示す。本試験機では負荷モータ、ボールネジ、LMガイドは開発した「電動型ビッカース硬さ試験機」と同様の機構を採用し、フレームの共通化を図るため、試料最大高さ(荷重ヘッド部のストローク)を100mm、試料最大奥行きを115mmに設定した。

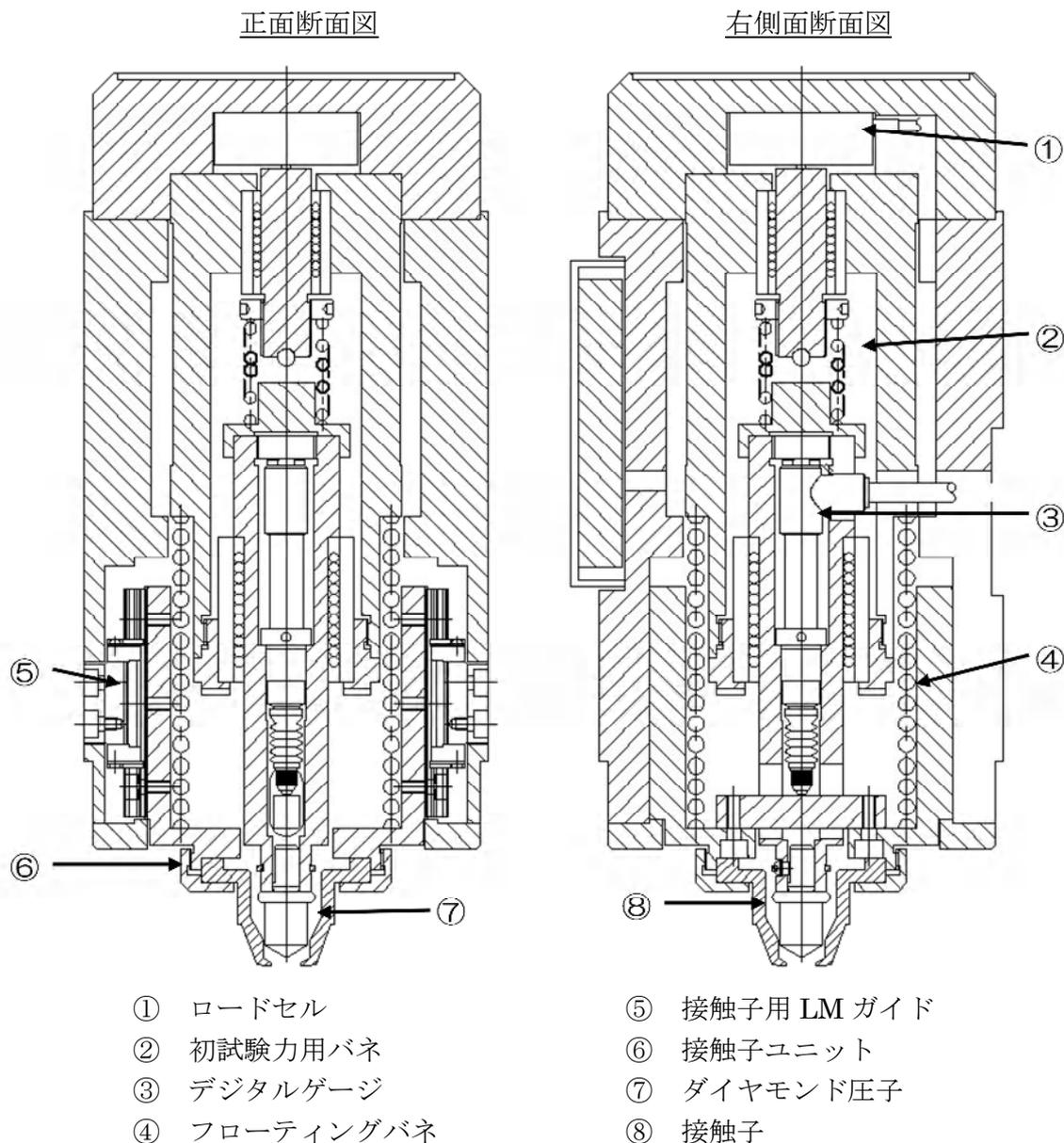


- |            |            |
|------------|------------|
| ① 負荷モータ    | ⑥ デジタルゲージ  |
| ② ボールネジ    | ⑦ 荷重ヘッド部   |
| ③ LMガイド    | ⑧ ダイヤモンド圧子 |
| ④ ロードセル    | ⑨ 接触子      |
| ⑤ ロードセルアンプ | ⑩ 測定台      |

【図2 電動型ロックウェル硬さ試験機の構造】

### ③ 荷重ヘッド部の構造

「電動型ロックウェル硬さ試験機」の荷重ヘッド部の構造を【図3】に示す。「電動型ロックウェル硬さ試験機」は「電動型ビッカース硬さ試験機」と異なり、試験力負荷動作の過程で硬さ演算を行うため、デジタルゲージは圧子先端又は荷重軸の動きをダイレクトに検出する機構を有する必要がある。



【図3 荷重ヘッド部の構造】

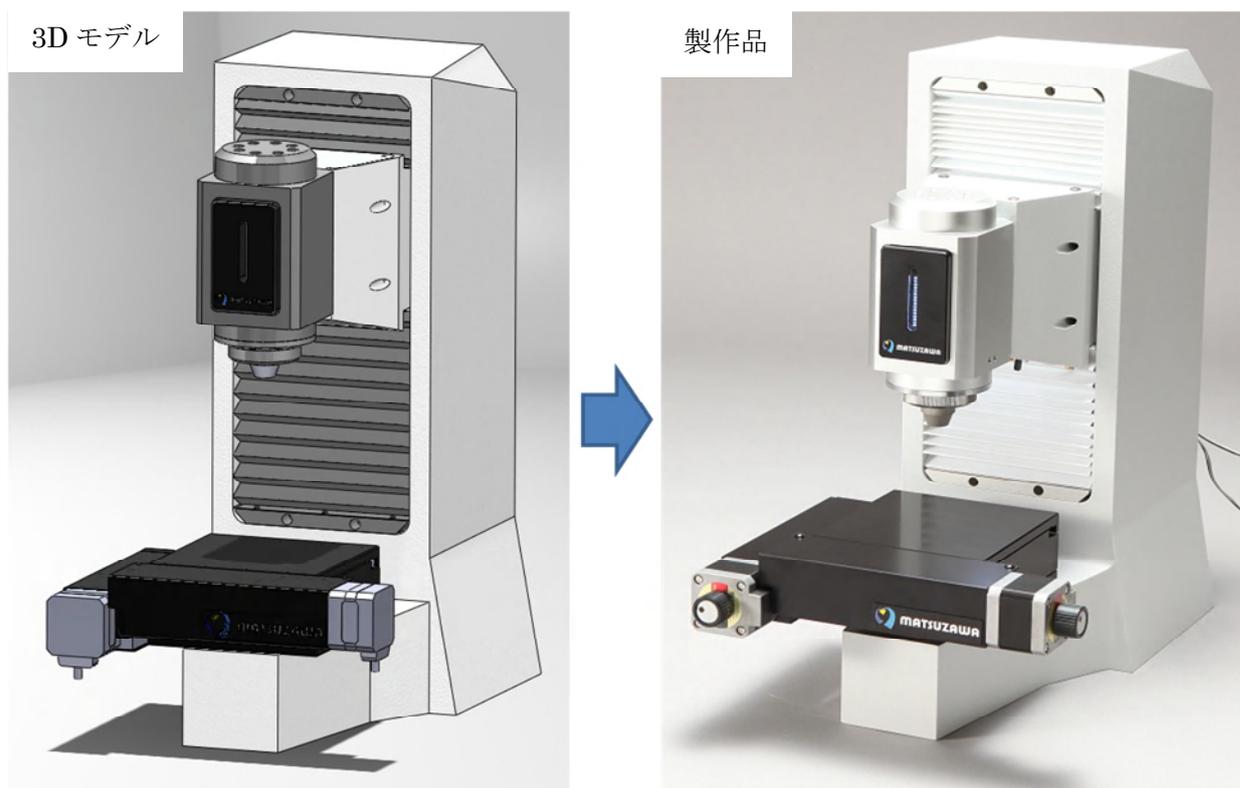
本試験機ではロードセルを用いた荷重フィードバック制御を行い、デジタルゲージの変位量よりロックウェル硬さの演算を行っている事から、荷重ヘッド部内部の荷重機構ではロードセル、

荷重軸、デジタルゲージ、接触子、及び圧子を同軸上に配する形状として、モーメント荷重による測定誤差の要因の低減を考慮した設計となっている。また上面基準測定では、接触子及びデジタルゲージの先端で試料上面の検出を行い、デジタルゲージの取り付け部を荷重軸と同期させる必要があり、且つ、ロードセルに力を伝えずに接触子ユニットを動作させる事が必要である。本試験機の接触子ユニットは、LM ガイドを用いたフリクションのない構造とし、初試験力負荷時の姿勢を保持するためのフローティングバネにより昇降動作の再現性を向上させ、同時に硬さ測定時の試料の固定を行える構造とした。

### 3) 研究成果

「電動型ロックウェル硬さ試験機」の製作前に 3 次元 CAD(Solidworks)を用いて 3D モデルを作成し、デザインレビュー後に試験機の製作を行った。【図 4】

製作した「電動型ロックウェル硬さ試験機」と外観はさほど変わらず製作できた。試験機サイズは、機体寸法が W150×D300×H400mm、重量が 26kg となり、従来型のロックウェル硬さ試験機と比べて寸法で 1/2 以下、重量で 1/3 以下の非常に軽量でコンパクトな試験機とする事が出来た。



【図 4 電動型ロックウェル硬さ試験機】

## 2-1-2 硬さ試験グリッパの開発

### 1) 研究目的

本研究で開発した「電動型ロックウェル硬さ試験機」及び「硬さ試験グリッパ試作 3 号機」を応用して、小型・軽量で産業用ロボットのアーム先端に組み込みや、任意の位置・角度に対して多点測定できる機構を考慮した「硬さ試験グリッパ」の設計・製作・評価を行う。

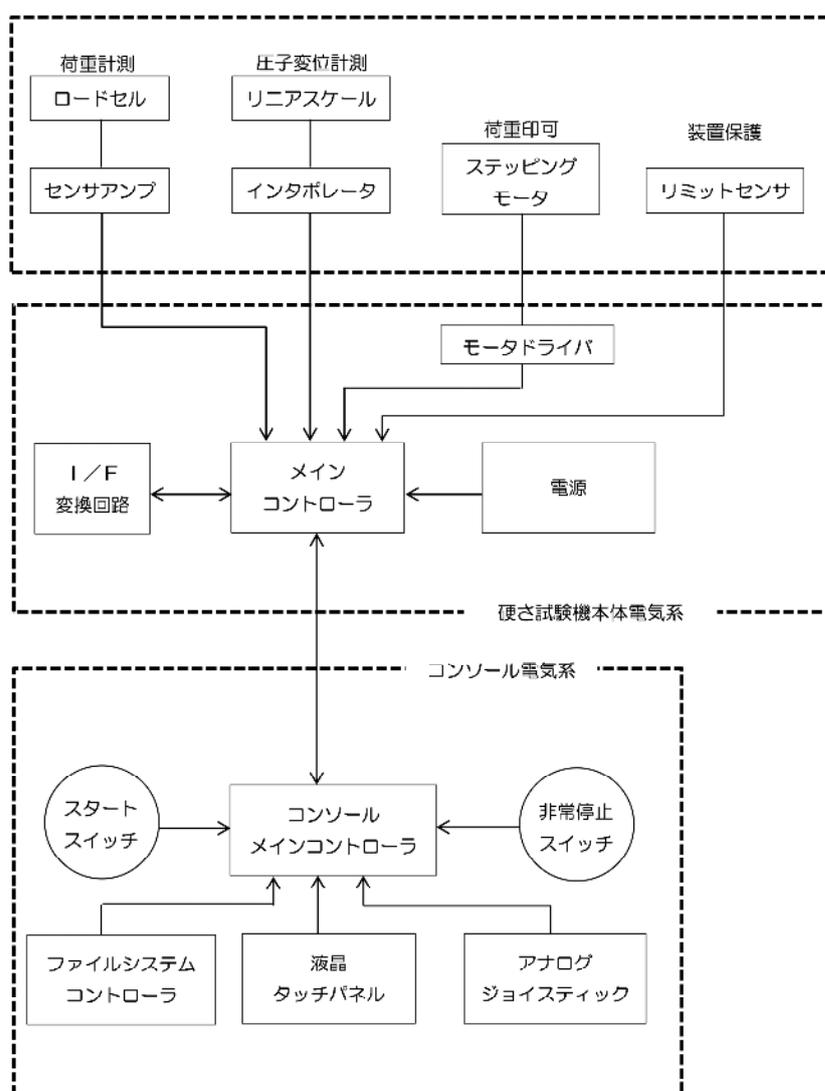
また「電動型ロックウェル硬さ試験機」は JIS や ISO 規格への対応、製品化に向けた改良からノウハウの蓄積を行い、電動型における硬さ測定技術の確立を行う。

### 2) 研究内容

#### ① 「硬さ試験グリッパ」の装置構成

本研究で開発した「電動型ロックウェル硬さ試験機」や、「硬さ試験グリッパ試作 3 号機」は、試験機本体、コントローラ、PC の 3 点から構成されている。しかし、「硬さ試験グリッパ」においては生産現場での使用やライン工程への組み込み時に、試験機本体とコントローラ及び PC が離れた場所に設置された場合では作業性が悪く、また接続ケーブルが長くなる事による性能低下が考えられる。そのため、本装置では、試験機本体に接続可能でコントローラと PC の機能を一体化したコンソールを開発し、オールインワンとなる装置構成とした。

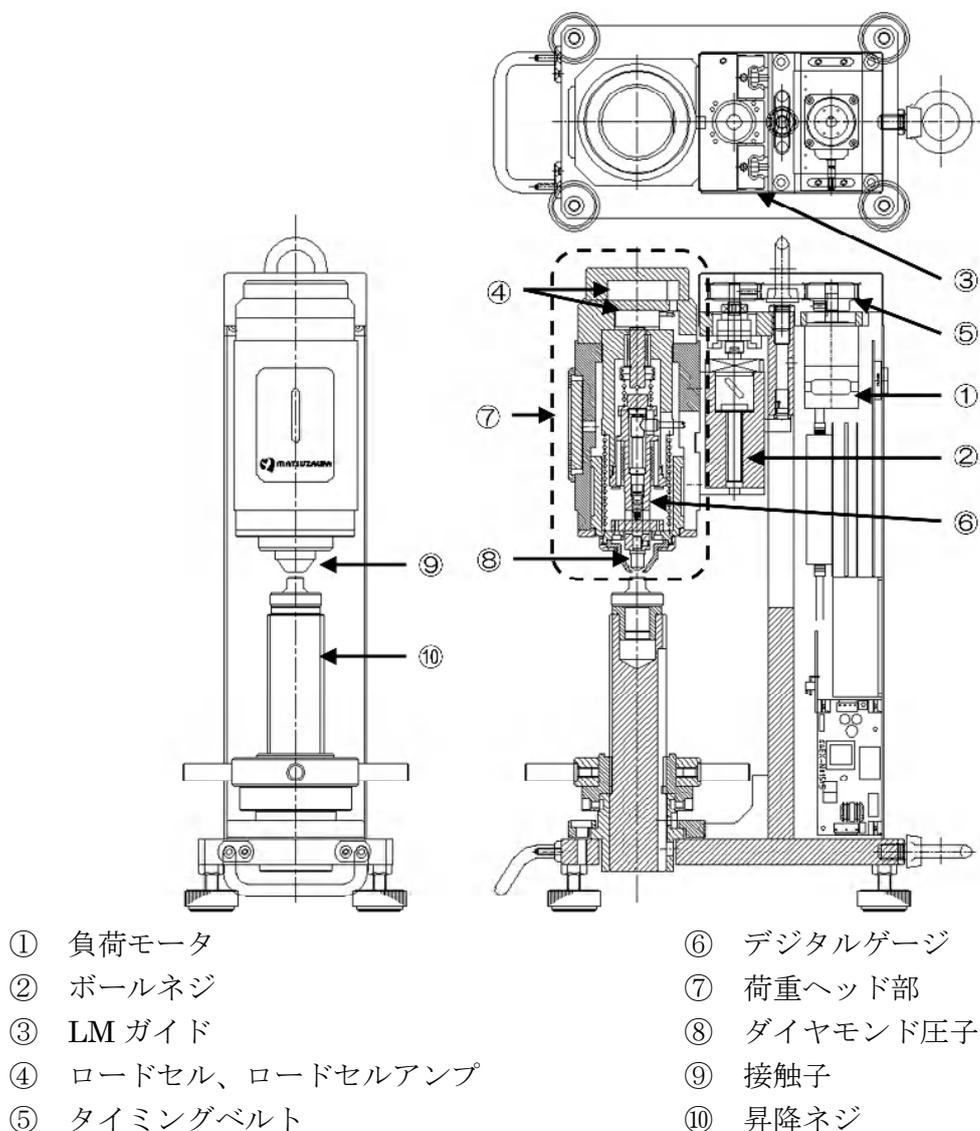
「硬さ試験グリッパ」の電気系ブロック図を【図 1】に示す。



【図 1 硬さ試験グリッパ電気系ブロック図】

② 「硬さ試験グリッパ」の設計

「硬さ試験グリッパ」の構造を【図2】に示す。



【図2 硬さ試験グリッパの構造】

「硬さ試験グリッパ」は「電動型ロックウェル硬さ試験機」と同等の性能を有し、小型・軽量とする事が理想的である。しかし、小型・軽量の「試作3号機」では上面基準の小型化・簡略化に関する技術要素が確立できなかったため、開発期間などを考慮し、「硬さ試験グリッパ」では試験機の小型化よりも過去の開発や従来機で実績のある構造、部品を採用し、確実な評価が行える仕様とした。

「硬さ試験グリッパ」の設計コンセプト、仕様を以下に示す。

a. 構成部品の配置

- ・ 研磨していない高張力鋼の評価を行うため、圧子軸とデジタルゲージを同軸に配置している電動型ロックウェル硬さ試験機の荷重ヘッド部を流用

- 試験機後部に電気部品を配置するため、駆動部はフレームの前方に移動し、伝達機構にタイミングベルトを用いてコンパクト化を実現
- b. 最大試料高さ
  - コンパクト化を実現するため、荷重ヘッド部のストロークを **50mm** に短縮
  - 代わりにストローク **100mm** の昇降ネジを取り付け、試料最大高さ **100mm** を実現
- c. 電気部品の配置
  - 耐ノイズ性を考慮し、ロードセルアンプをロードセルの近くに配置
  - 作業性やメンテナンス性、**EMC** を考慮し、全ての電気部品を背面パネルに収納
- d. 工場内の可搬装置への組み込み
  - 産業ロボットのマテハンに取り付け可能な接続治具を装備
  - バランサーに取り付け可能なアイボルトを装備
- e. 手動操作、表示パネル
  - 試験機本体に装着可能な **4.3** インチ液晶パネル付きコンソールを開発し、**PC** 機能と手動操作用コントローラを一体化
  - 遠隔操作による自動運転(産業用ロボットへの組み込み)を考慮し、外部入力端子(**USB** 端子)を有しており、外部入力端子を介し、タッチパッドや **PC** と接続し、本体のコントロールが可能
  - コンソールは、アナログジョイスティック、試験開始ボタン、非常停止ボタン、液晶パネルを備え、演算機能やデータ保存機能、データ出力用 **USB** 端子を有している。

### 3) 研究成果

【図 3】に製作した「硬さ試験グリッパ」を示す。試験機サイズは **150×260×460 mm**、重さは **22kg** となっている。



【図 3 硬さ試験グリッパ】

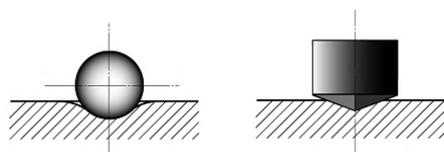
## 2-2 標準の”硬さ試験機”と同等の検査精度の実現のための補正技術の開発

### 1) 研究目的

様々な表面状態を有する測定物に重力場に対して任意の方向にグリッパ形状で応力を加えた場合、“硬さ”そのものの精度を保証することは難しいと考えられる。そのため、構造解析や材料力学によるシミュレーション技術を応用し、低侵襲または非破壊で精度の高い計測技術を確立することは必須である。本研究は、更新型ラグランジュ法および有限要素モデルを適用し、表面変質層を考慮した材料特性のシミュレーションを行う。

### 2) 研究内容

硬さ試験は【図 1】に示すように、球状圧子を用いるブリネル、ロックウェル試験やダイヤモンド圧子を用いるロックウェル、ビッカース試験がある。有限要素法を用いた硬さ試験のシミュレーションは試験材料の弾塑性の非線形性、材料と圧子の接触領域の変化に伴う非線形性を考慮した解析を行う必要がある。本研究では、押し込み量を少しずつ増加させながら解析する更新型ラグランジュ法を適用する。



(a) 球状圧子 (b) ダイヤモンド圧子

【図 1 硬さ試験】

試験材料は【図 2】に示すように荷重負荷に弾性領域では直線的に変化し、降伏点 $\sigma_Y$ を越えると曲線の加工硬化に応じて曲線の傾きが変化し、非線形性を示す。また、点 A で荷重を除荷すると直線的に減少し、点 B で永久ひずみ(塑性ひずみ)が残る。

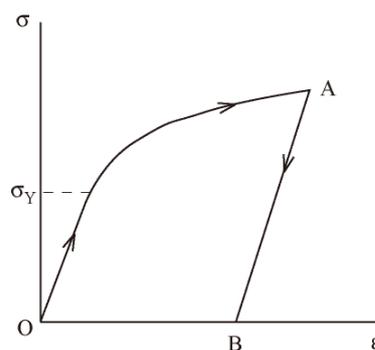
増分形式で応力とひずみの関係は一般に次のように与えられる。

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl}(\sigma_{mn})\dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\sigma}$  は応力増分、 $\dot{\epsilon}$  はひずみ増分、 $D_{ijkl}$  は係数である。材料の降伏条件を von Mises の基準で与えると、次式のように示することができる。

$$\bar{\sigma} - \sigma_Y = 0 \quad (2)$$

ただし、 $\sigma_Y$  は単軸引張りの降伏点、 $\bar{\sigma}$  は von Mises の相当応力であり、次式で与えられる。



【図 2 弾塑性の挙動】

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma'_{ij}$  は偏差応力である。

弾性領域において応力、ひずみの係数  $D_{ijkl}$  は

$$D_{ijkl} = 2\mu \left( \frac{\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}}{2} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} \right) \quad (4)$$

ここで、 $\mu$  は横弾性係数、 $\nu$  はポアソン比、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーデルタである。

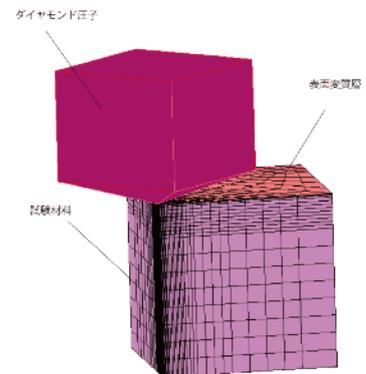
塑性領域において応力、ひずみの係数  $D_{ijkl}$  は

$$D_{ijkl} = 2\mu \left\{ \frac{\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}}{2} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} - \frac{3\sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}^2 [1 + H/(3\mu)]} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $H$  は材料の加工硬化率である。

解析に用いた有限要素モデルの例を【図 3】に示している、モデルはダイヤモンド圧子、試験試料および熱処理後の黒皮などに相当する表面変質層から成る。試験材料の解析領域は対称性を考慮して 1/4 領域のみ作成した。有限要素分割は 8 節点六面体要素を用いて、総節点数 6867、要素数 5760 として、解の収束性、安定性を含めて検討した。

ダイヤモンド圧子は剛体とし、試験材料およびその表面変質層は加工硬化率  $H = 0$  の弾塑性体とした。



【図 3】有限要素モデル

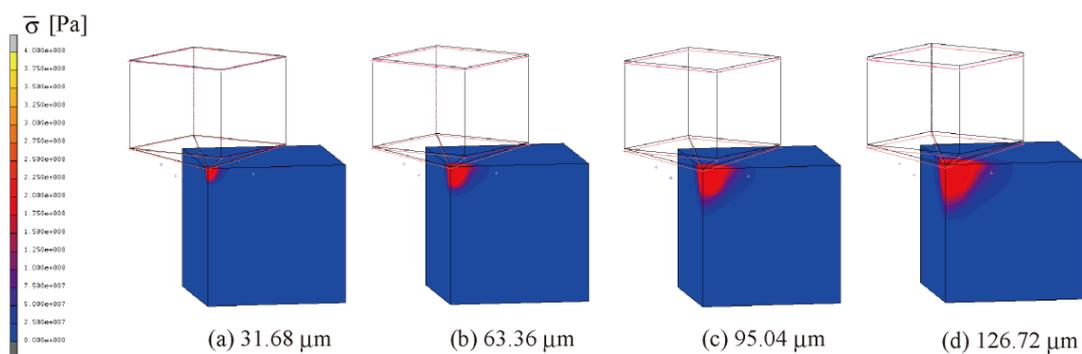
### 3) 研究成果

はじめに【図 3】に示した有限要素モデルをもちいて、表面変質層による影響を調べた。試験材料の降伏点を 200MPa、表面変質層の降伏点を 400MPa、厚さを 0.025mm とした。

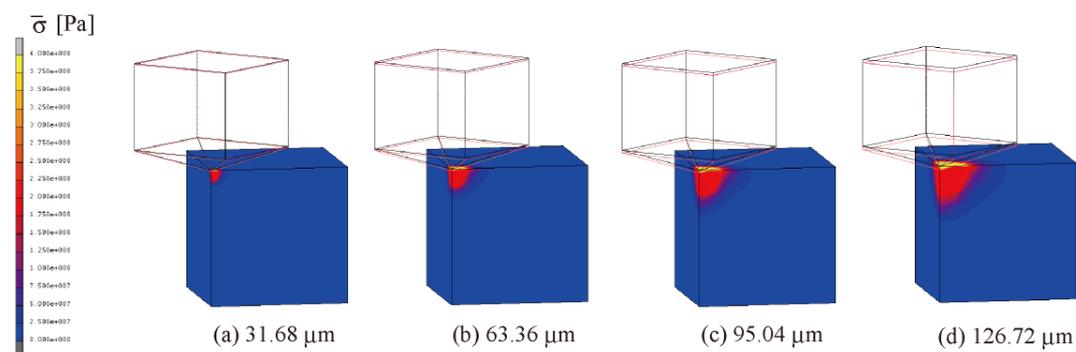
【図 4】は表面変質層がない場合、【図 5】は表面変質層を考慮した場合のダイヤモンド圧子の押し込み深さと内部応力の関係を von Mises の相当応力  $\bar{\sigma}$  の分布を用いて示したものである。図中において(a)31.68 $\mu$ m、(b)63.36 $\mu$ m、(c)95.04 $\mu$ m、(d)126.72 $\mu$ m はそれぞれ圧子の押し込み深さを表している。【図 4】において、材料の降伏点を 200MPa としているので、200MPa に相当する色で示された降伏領域が押し込み深さとともに拡大することがわかる。一方、表面変質層を考慮した【図 5】の場合は、変質層の降伏点を 400MPa として異なる降伏点でモデル化していることから、表面部分が 400MPa の応力に相当する黄色で示されている。

【図 6】は【図 4】と【図 5】に示した表面変質層がない場合と表面変質層を考慮した場合の

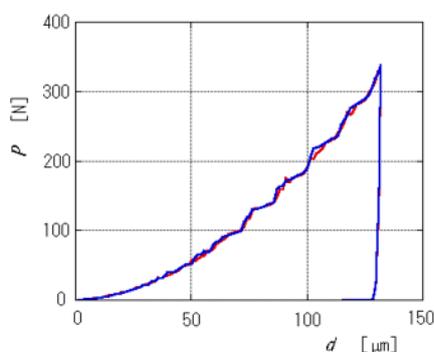
ダイヤモンド圧子の押し込み深さと押し込み荷重の関係を示したものである。図において、朱色の線が表面変質層がない場合、青色の線が表面変質層を考慮した場合である。接触領域が増えることから、いずれも押し込み深さとともに荷重の増加率が大きくなる。さらに、荷重を除荷すると、若干の弾性回復とともに荷重が低下し、圧痕に相当する深さが残る。また、現段階の解析モデルや精度では表面変質層がない場合と表面変質層を考慮した場合の荷重曲線に及ぼす差は小さい。図において、曲線に若干の凹凸が存在するのは、解析における増分量に対して、要素分割が大きいことに起因しているものである。



【図 4 表面変質層がない場合の圧子の押し込み深さと応力分布の関係】



【図 5 表面変質層を考慮した場合の圧子の押し込み深さと応力分布の関係】



【図 6 圧子の押し込み深さと荷重の関係】

## 2-3 硬さ計測のための周辺技術の開発

### 1) 研究目的

電動型ロックウェル硬さ試験機(TESt2011model)への組み込みを考慮した、コンパクトで計測レンジが広く、低ノイズで分解能が高い荷重センサの計測用回路(ロードセルアンプ)の開発を行う。

### 2) 研究内容・成果

ロードセルアンプ及びA/Dコンバータの構成・性能については、平成22年度の報告書に詳説したので、ここでは割愛する。以下、その要点を3点列記する。

- i. アンプ及びA/Dコンバータを、ロードセルのできるだけ近くに配置することによって、外来ノイズの影響を低減させる。すなわち、アナログ信号線をできるだけ短くし、コントローラとの通信は、デジタル信号のみで行う。
- ii. 商用周波数の50Hz成分に重畳するノイズをカットするために、Sin<sup>4</sup>C フィルターを入れ、50Hzの整数倍でノッチを設ける。
- iii. 上記i、ii対策により、ノイズフリー有効ビット=19ビットを達成した。

本研究は、ロードセル入力電圧のノイズ低減及び温度安定性に取り組み、ノイズフリー有効ビットの更なる上積みを目指した。

ロードセル入力電圧を生成しているのは、第2世代超高精度XFET(eXtra implanted junction FET)技術を用いた、シャントレギュレータ方式のリファレンス電圧生成ICである。本ICは、低ノイズ、高精度、長時間安定性に優れた性能を有している。

しかし、リップル除去率(Ripple Rejection Ratio RRR)は-75dBで、高精度OPアンプのトップクラスの性能-90dBに比較すると、やや性能が落ちると言わざるを得ない。

そこで、本開発では、このリファレンス電圧生成ICに入力する電源のリップルをさらに低減することで、ロードセル入力電圧のノイズを低減しようと試みた。

そもそも直流電源というものは、それがスイッチング方式であれ、シリーズレギュレータ方式であれ、出力部は脈流電圧を整流しているわけであるから、リップルがゼロということは絶対あり得ない。

また、リップルを低減しようとして、直流電源の後に、何段もシリーズレギュレータを配置しても、半導体から発するポップコーンノイズやホワイトノイズが、配置した数だけ重畳されるので、リップルは低減されても、トータルノイズは逆に増加してしまうという結果になる。では、平滑回路に大容量コンデンサを用いて、サグ率を低減すればいいかというと、サグを1mV以下に抑えるためには、数十ファラッドという非現実的な値になってしまう。これも実用性がない。

そこで、本開発では、ロードセルアンプのフィルター特性に着目した。Sin<sup>4</sup>C フィルターを入れているわけであるから、50Hzの整数倍ノイズは、-110dB以上除去してくれるはずである。もし、50Hzのリップルが、数ミリボルト以下であれば、リファレンス電圧生成ICのフロアノイズに埋もれてしまうはずだと考えた。

すなわち、電源のパワー源は、商用電源を鉄心トランスで降圧するいわゆるトランス式シリー

ズレギュレータ方式の方が有利だと考えた。

この方式で構成したロードセル入力電圧生成回路構成を【図 1】に示す。そして、得られたロードセル入力電圧のノイズ波形を【図 2】に示す。【図 2】の値は、ほぼカタログ値すなわちチャンピオンデータに匹敵するところまで到達した。

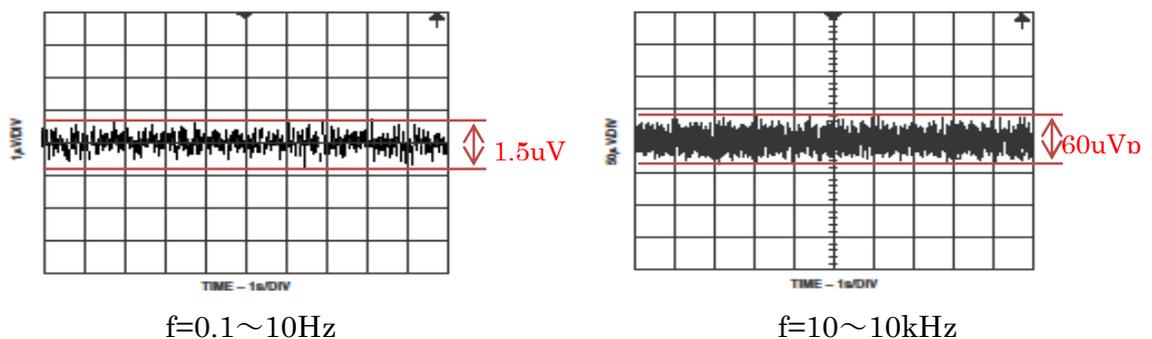
本ロードセルアンプの性能は、ノイズフリー有効ビット=19.5 ビットを達成した。この値も、アンプと A/D コンバータの性能を、ほぼ 100%引き出したものといえる。

わずか 0.5 ビットの進歩であったが、この進歩のおかげで、電動型ビッカース硬さ試験機における最小試験荷重値を、当初目標値の 100gf から 50gf に、向上することができる可能性が出てきた。その根拠は、定格荷重 50kgf のロードセルを用いた場合、19 ビットの分解能で、最小荷重分解能は、 $50\text{kgf}/2^{19}=50,000\text{g}/524,288\approx 0.1\text{gf}$  となる。ここで、最小分解能の 10 倍で精度保証をすると、 $0.1\text{gf}\times 10=1\text{gf}$  となり、100gf の 1% 値である。これが、当初目標値であった。19.5 ビットの分解能では、同様の計算で、 $50\text{kgf}/2^{19.5}\approx 0.07\text{gf}$  となり、10 倍精度保証で、未だ 50gf には達しないが、装置の制震化、荷重印可速度の最適化等の対策を講ずれば、到達不可能な値ではないと考える。

【図 3】に、アンプ及び A/D コンバータ回路基板と、トランス式シリーズレギュレータ方式の入力電圧生成回路の外観を示す。



【図 1 ロードセル入力電圧生成回路構成】



【図 2 ロードセル入力電圧のノイズ波形】



ロードセル入力電圧生成回路



アンプ・A/D 回路

【図 3 ロードセル入力電圧生成回路とアンプ・A/D 回路】

## 2-4 硬さの計測環境を整えるための制御手法の確立

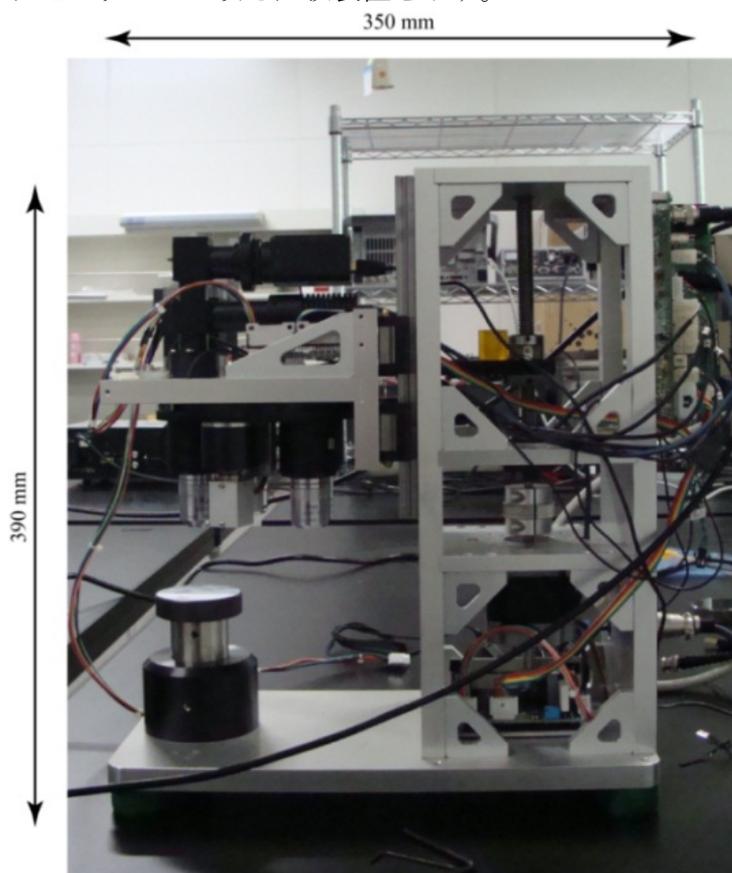
### 1) 研究目的

現在の微小硬さ試験機の多くは、錘で荷重を与える機械式の荷重負荷方式が採用されており、機械的な摩擦の影響もあり、荷重範囲 0.001~20N を精度良く試験する装置は開発されていない。そこで、電気機械式の硬さ試験機について検討を行っている。本装置では、圧子を駆動するアクチュエータへの指令信号を制御することにより、発生力を制御することができる。本研究では、試作された電気機械式ビッカース硬さ試験機を用いて、外乱振動を抑制する制御法について検討を行う。

### 2) 研究内容

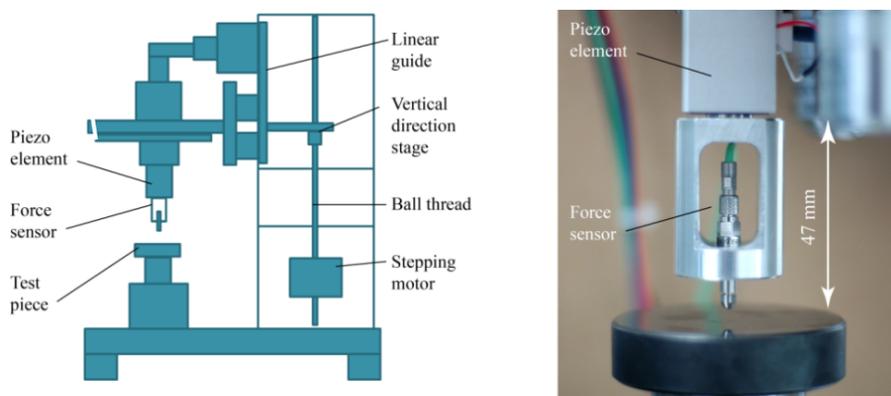
#### ① 試作した装置

【図 1】に試作されたビッカース硬さ試験装置を示す。



【図 1 試作されたビッカース硬さ試験装置】

【図2】左図に本装置の構成を、右図にセンサ部の拡大写真を示す。装置は、ステッピングモータ、ボールねじ、昇降ステージ、リニアガイド、圧電素子、力センサからなる。なお、力センサには水晶式(キスラー製小型高感度力センサ9215)を用いた。本装置では、2つのアクチュエータを搭載しているが、ステッピングモータは粗荷重を、圧電素子は微小荷重を担当する。



【図2 装置の構成(左)とセンサ部の拡大写真(右)】

荷重を負荷する手順は、次の通りである。

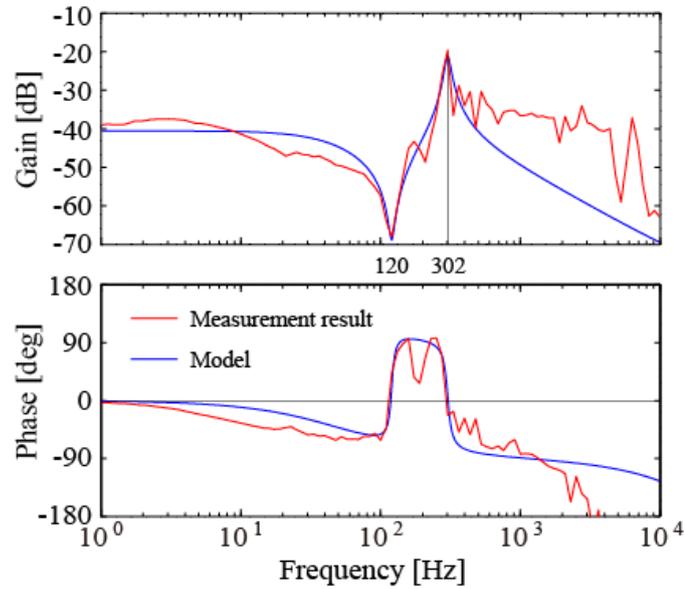
1. 試験片と力センサの距離を、硬さ試験を行う際の高さに設置する。
2. ステッピングモータを駆動し、昇降ステージをボールネジと並行して配置されているリニアガイド上を移動させる。
3. 圧子(力センサ)が試験片に接触後、目標荷重の $x\%$ になるまで、ステッピングモータで荷重を負荷する。
4. 目標荷重の $x\%$ に到達後、ステッピングモータを停止させ、アクチュエータを圧電素子に切り替える。
5. 圧電素子で目標荷重に到達させ、硬さ試験に必要な時間、その荷重を保持する。
6. 荷重の負荷が終了したら、圧子(力センサ)を初期位置に戻す。

外乱振動が問題になるのは、一定時間、荷重を負荷している間であるため、本研究では、ステッピングモータを動作させず固定位置で止め、圧電素子を用いた微小荷重制御について検討する。

## ② 周波数特性の測定

圧電素子を用いて荷重負荷を行う際の基礎特性を把握するため、周波数応答を測定した。測定は、ステッピングモータを手動で回し、試験片と圧子(力センサ)を接触させて行った。なお、周波数応答の測定には、FFTダイナミックシグナルアナライザ(アジレントテクノロジー35670A)を用い、500 mVpkのスweep正弦波を用いた。

【図3】に測定結果を示し、上図がゲイン線図、下図が位相線図である。図より、周波数が120Hzのとき反共振特性を、302Hzのとき共振特性を有していることがわかる。



【図 3 圧電素子を用いた荷重負荷装置の周波数特性】

この結果より、荷重制御法の検討は、共振特性と反共振特性を 1 つずつ、また位相が遅れていることから 1 次遅れ要素を有するモデルを想定して行うこととした。本研究では、次の伝達関数  $P(s)$  で表されるモデルを用いた。

$$P(s) = \frac{K(s^2 + 2\xi\omega_s s + \omega_s^2)}{(Ts + 1)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}$$

ここで、 $K=0.0591$ 、 $\xi=0.04$ 、 $\omega_s=120 \times 2\pi$  rad/s、 $T=0.003$ 、 $\zeta=0.05$ 、 $\omega_n=302 \times 2\pi$  rad/s とした場合の周波数応答を【図 3】に示す。図より、特徴的な 120Hz の反共振特性および 302Hz の共振特性に加えて、反共振周波数 120Hz より低域の特性も、測定結果におおよそ一致しているといえる。

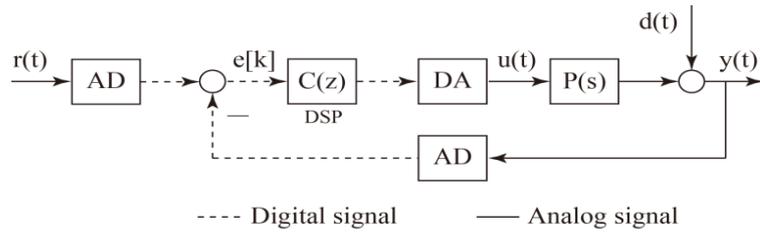
$P(s)$  をサンプリング周波数 50 kHz で離散化すると、次式のパルス伝達関数  $P(z)$  が得られた。

$$P(z) = \frac{0.0003924z^{-1} - 0.0007843z^{-2} + 0.000392z^{-3}}{1.00 - 2.988z^{-1} + 2.978z^{-2} - 0.9896z^{-3}}$$

### ③ 制御系の構成

前項より、測定結果と  $P(s)$  で表されるモデルは、周波数特性がおおよそ一致していたため、本研究ではこのモデル伝達関数  $P(z)$  を用いて外乱振動を抑制する制御系について検討する。

【図 4】にフィードバック制御系のブロック線図を示す。図中の実線はアナログ信号を、点線はデジタル信号を表している。また、図中の  $P(s)$  が圧電素子を用いた荷重負荷装置を表しており、 $u(t)$  が圧電素子への印加電圧、 $y(t)$  が制御量の荷重である。目標荷重は  $r(t)$  で表されており、制御の目的は、目標荷重  $r(t)$  と制御量の荷重  $y(t)$  との偏差  $e[k]$  が小さくなるように、コントローラ  $C(s)$  を設計することである。



【図4 フィードバック制御系のブロック線図】

一方、図中の  $d(t)$  は外乱を表しており、荷重制御中にシステムに混入する外部振動などを想定している。この場合、外乱  $d(t)$  が制御量  $y(t)$  に与える影響は、次の感度関数  $S(s)$  により評価することができる。

$$S(z) = \frac{1}{1 + P(z)C(z)}$$

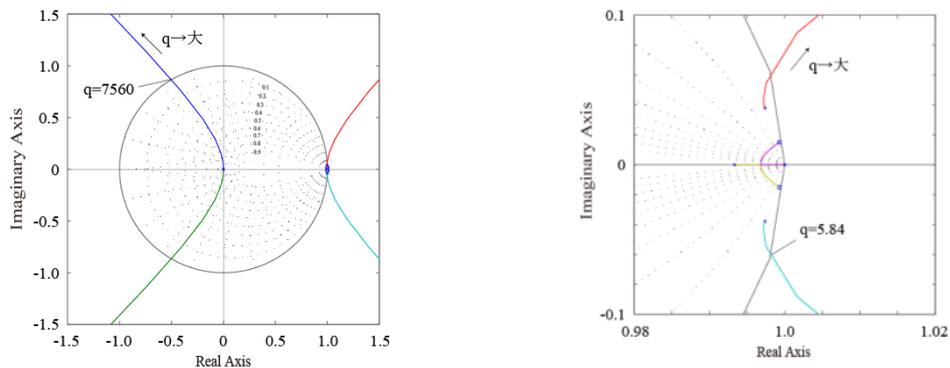
本研究では、定常偏差がなく、目標荷重への高精度追従性能を実現するため、コントローラ  $C(z)$  は、次式で与えられる積分型のコントローラとした。

$$C(z) = \frac{qz^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

ここで、外乱の影響を抑制するためには、感度関数  $S(z)$  におけるゲイン特性が小さくなれば良く、これを実現するためにはコントローラ  $C(z)$  の  $q$  の値は大きい方が良い。このため、この特性を考慮しながら、制御系の安定性を保証するには、 $q$  の値を変化させたときの制御系の極の移動を示す根軌跡を明らかにするのが有用である。

#### ④ 安定化可能なゲインの範囲

【図5】に計算により求めた離散時間制御系の根軌跡を示す。なお、計算では実験で使用する DSP (Digital Signal Processor) の 2 サンプルの遅れを考慮した。離散時間系では、極が単位円内に存在すれば安定であるが、下図に示すように  $q=5.84$  のとき安定限界となり、それ以上に大きくしていくと単位円外に極がはみ出すことがわかり、制御系は不安定となる。したがって、 $0 < q < 5.84$  の範囲で  $q$  を決定する必要がある。



【図5 根軌跡 全体図(左)拡大図(右)】

## 2) 研究成果

本研究では、制御系に混入する外乱の影響を抑制するため、低感度化について検討を行い、根軌跡を用いて制御系を安定化するコントローラのゲインの範囲を求め、本項目の目的を達成した。

### 3-1 全体総括

“硬さ試験”は非常に古くからある材料試験技術のひとつである。自動車産業に限らず製造におけるインライン計測への適用は新たなニーズであり、海外展開における地産地消を基本とする現地生産には、不可欠な技術となるものである。またこの要求に合致した製品または技術を持ち合わせている“硬さ試験機メーカー”は世界的にも存在していない。本事業は川下企業である日野自動車(株)と密接に連携し、技術開発を産学官連携で行ったものである。事業終了後も開発を継続し製品化に一番乗りできれば、未開発の分野であるため性能面、優位性や競争力は当然として、価格面におけるプライスリーダーになれる潜在的資質を有しているだけでなく、将来、(株)マツザワの主力製品になることは間違いないものと考えられる。

本事業の提案はアドバイザーである日野自動車(株)のニーズが発端であるが、平成 22 年度から一貫して生産ラインで活用できる据え置き型のロックウェル試験機の実用化を目指してきた。実施計画に記載した具体的な技術的数値目標は、各年度の各章に示した通りで、9 割強は達成できたものとする。

最終となる平成 24 年度は、工場のインラインに適合した“硬さ試験グリッパ実証機”を開発し、川下企業の工場内で実証実験を行えるところまで、完成度を上げることができた。また平成 24 年 6 月には上面基準型の電動型ロックウェル硬さ試験機(TEST2011 model)を市販化した電動型ロックウェル試験機(商用 1 号機)を納入することができた。事業終了後も「インラインに適した計装化押し込み試験方法」の確立や FEM 構造解析を用いた“硬さ試験”のシミュレーション検証、外部振動にロバストな制御技術の確立など現在の体制を維持しながら、産学官連携による研究開発進め、新たな“硬さ試験技術”の実用化を創造する。