

平成 2 2 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

『ナノトルク自動制御を活用した「微細切削加工技術ノウハウ構築支援システム」開発』

研究成果等報告書

平成 2 3 年 3 月

委託者 近 畿 経 済 産 業 局

委託先 財団法人大阪産業振興機構

「紙へリサイクル可」

成果報告書目次

第1章 研究開発の概要

1 研究開発の背景・研究目的及び目標	・・・P.	3
2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	・・・P.	4
3 成果概要	・・・P.	7
4 当該プロジェクト連絡窓口	・・・P.	9

第2章 本 論

1 概要と目的	・・・P.	10
2 研究内容及び成果	・・・P.	11
【1】－① ナノトルク自動制御技術の検証（ハード）	・・・P.	11
【1】－② システム機器の改善、改良（ハード）	・・・P.	13
【2】 システム構築の研究（ハード・ソフト開発）	・・・P.	15
【3】 微細加工基礎データベース研究	・・・P.	17

第3章 最終章 全体総括

まとめ	・・・P.	25
-----	-------	----

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

〔研究の背景及び目的〕

需要が広がる情報家電向け微細金型製作や微細切削加工現場では、微細加工条件のデジタル化が進んでおらず、「職人の経験値」に頼って加工されている状況にある。また、微細切削加工工具（直径 $50\mu\text{m}$ 以下）は、通常の工具の何十倍から何百倍もする高価なものであるが、その品質保証システムは画像による形状確認にとどまり、本来必要な微小加工時に発生する「微細加工トルク」に対する剛性を有しているかどうかの保証はされていない。そのため硬度の高い材料を加工する際、工具欠損や折損の不安が常にあるため、微細金型製造や微細加工時の低コスト化、短納期化への大きな妨げとなっている。

これらを解決するためには、「微細加工条件を数値化するシステム」と「微細加工トルクを計測する技術」が大きな鍵となる。このため、本研究開発では、「微細切削加工技術ノウハウ構築支援システム」の研究開発に取り組み、微細加工に対する川下産業の強い要請に大きく貢献することを目的としている。

〔研究目標〕

（サブテーマ1）ナノトルク自動制御技術の研究（ハード開発）

①ナノトルク自動制御技術の実験と検証（ハード）

高精度化、微細化に対応した金型技術の高度化を実現する為には、高度な微細切削加工トルク計測技術の確立が求められている。また今後の微細加工の技能伝承と技能蓄積など人材育成のためにも微細加工条件を数値化し蓄積するためのシステムが必要とされる、これらの課題実現を目指し、「微細切削加工トルク」を検出するために、 $1\mu\text{Nm}$ 以下の計測分解能を持つ磁気浮上テーブルを製作し、トルク計測分解能 $1\mu\text{Nm}$ 以下のナノトルク（ $800\sim 1,000\text{nNm}$ ）の計測分解能に向上させることを目標とすると同時に自動制御技術の確立を目指す。

- ・ （平成20年度）高精度磁気浮上テーブルの開発・製造/ナノトルク自動制御技術の実験
- ・ （平成21年度）汎用磁気浮上テーブルの開発・製造/ナノトルク自動制御技術の実験
- ・ （平成22年度）製作した磁気浮上テーブルのトルク計測検証実験/ナノトルク自動制御技術の実験

②システム機器の改善、改良（ハード）

開発した磁気浮上ステージを実際の現場で使用し、改善が必要な部分を改善し、実際の現場で利用できる機器へと改良していく。

- ・ （平成20年度）磁気浮上テーブルの振動問題に対し3DCAD有限要素により振動解析を行い改善。
- ・ （平成21年度）分光式変位センサーを用いることで体積比 $1/7$ の高精度磁気浮上テーブル改善製作。
- ・ （平成22年度）実際に使用した現場のニーズを加味しインターフェイスを改善。

(サブテーマ2) システム構築の研究 (ハード・ソフト開発)

直径100 ミクロン以下の微細工具を用いた微細加工技術の量産化技術の確立や、コストダウンを図るため、微細切削加工技術ノウハウ構築を支援するシステムが求められている。

本研究では、微細加工時に発生する微細トルクを計測できる「磁気浮上テーブル」を用いて、上記の微細切削加工技術ノウハウ構築支援システムの実現を目指し、システムとしてのハード機器の開発、システム操作のためのアルゴリズムや操作マニュアルなどのソフト開発を行う。

- ・ (平成20年度) 刃先位置画像検出装置の開発/操作プログラム、操作フローチャート開発
- ・ (平成21年度) 刃先位置画像検出装置の改良、体積1/3実現/微細切削加工支援アルゴリズムの開発
- ・ (平成22年度) インターフェイスプログラム改善、トラブル時操作手法の確立。

(サブテーマ3) 微細加工基礎データベース研究

①微小穴加工データベース構築

金型素材などの金属系素材の微細加工基礎データベースを作成する。

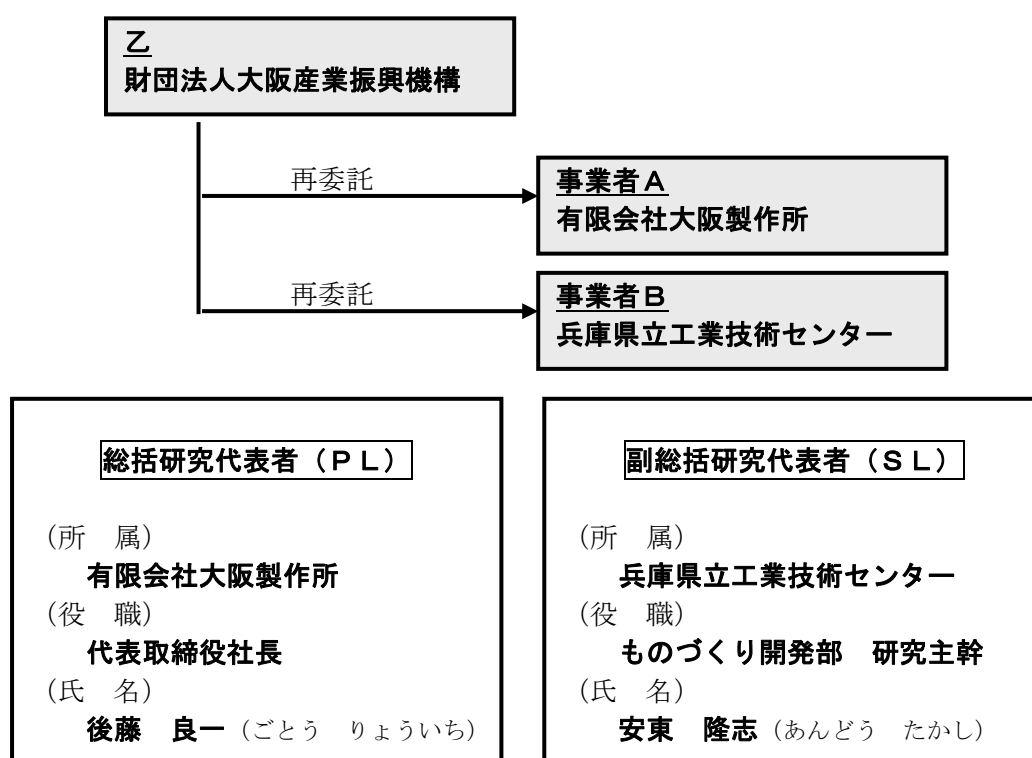
100 μ m以下の微細ドリルを使用し、開発した磁気浮上テーブルや刃先位置画像検出装置など「微細切削加工技術ノウハウ構築支援システム」を用いて実際に微細切削加工技術のノウハウ構築実験を行う。

- ・ (平成20年度) 磁気浮上テーブルと刃先位置画像検出装置で各種微細ドリルのトルク検出実験
- ・ (平成21年度) 各種素材に50 μ m～10 μ mのドリル加工実験を行い基礎データを作成した。
- ・ (平成22年度) 微細加工データベース作成の為、各種実験検証を行った。

1-2 研究体制 (研究組織、管理体制、研究者氏名、協力者)

1-2-1 研究組織及び管理体制

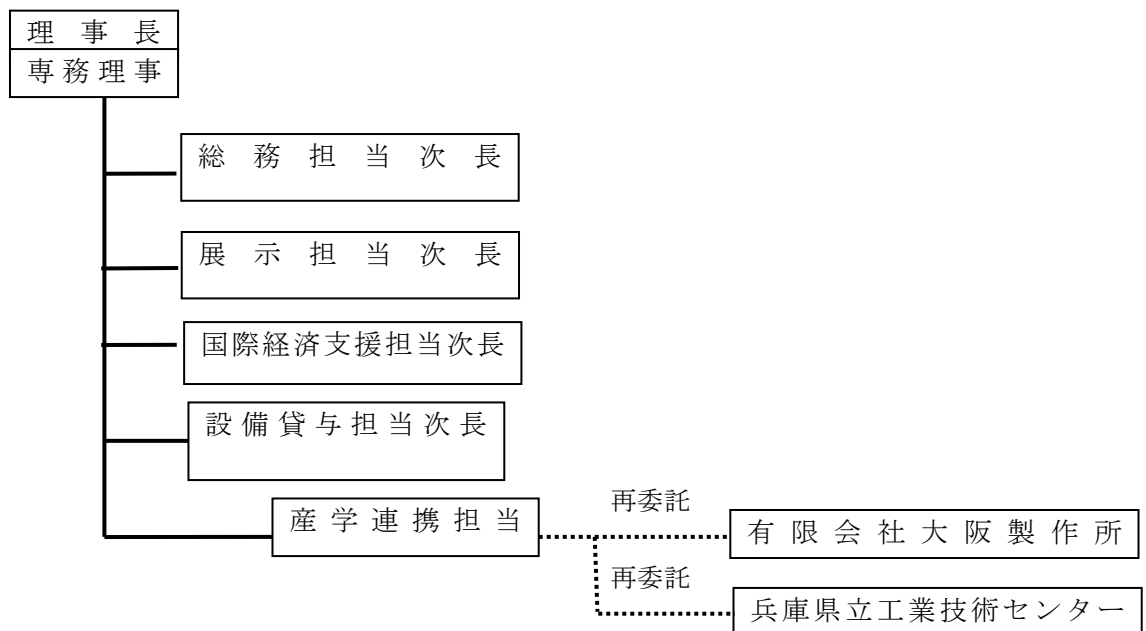
(1) 研究組織 (全体)



2) 管理体制

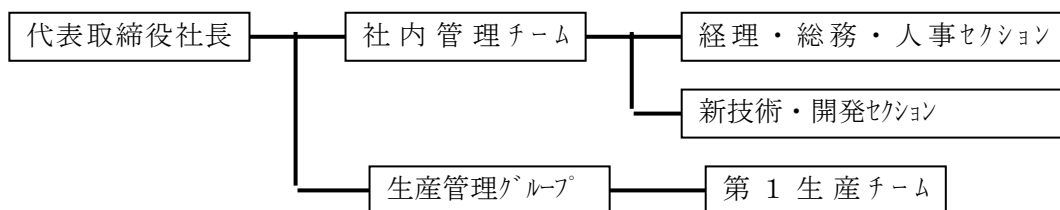
①事業管理者

〔財団法人大阪産業振興機構〕

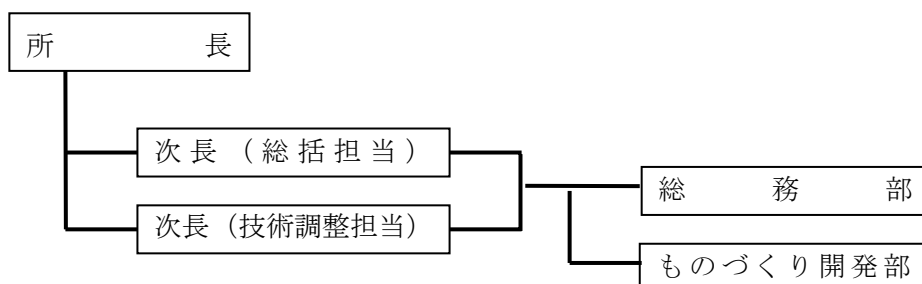


②再委託先

有限会社大阪製作所



兵庫県立工業技術センター



(3) 管理員及び研究員

【事業管理者】

財団法人大阪産業振興機構

① 管 理 員

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
矢野 光 伸	事業局長	【 4】
八幡谷 憲治	クリエイション・コア東大阪 産学連携担当課長補佐	【 4】

② 研 究 員 （なし）

【再委託先】※研究員のみ

有限会社大阪製作所

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
後 藤 良 一	代表取締役社長	【 1】①②、【 2】①【 3】①②
後 藤 昭	チームリーダー	【 1】①②、【 2】①【 3】①②

兵庫県立工業技術センター

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
安 東 隆 志	ものづくり開発部 主任研究員	【 1】①②、【 2】①
阿 部 剛	ものづくり開発部 主任研究員	【 1】①②、【 2】①

(4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人大阪産業振興機構

(経理担当者) クリエイト・コア東大阪産学連携推進課 課長補佐 八幡谷 憲治

(業務管理者) 事業局長 矢野 光 伸

(再委託先)

有限会社大阪製作所

(経理担当者) 経理・総務・人事セクション 寺西 美織

(業務管理者) 代表取締役社長 後藤 良一

兵庫県立工業技術センター

(経理担当者) 総務部 総務部次長 渡辺 誠

(業務管理者) ものづくり開発部 研究主幹 安東 隆志

(5) 知的財産権の帰属

知的財産権は全て当方に帰属することを希望

(6) その他

なし

3 成果概要

【1】ナノトルク自動制御技術の研究（ハード開発）

① ナノトルク自動制御技術の実験と検証

・ （平成20年度）高精度磁気浮上テーブルの開発・製造/ナノトルク自動制御技術の実験

従来のトルク計測分解能 $10\ \mu\text{Nm}$ を $1\ \mu\text{Nm}$ 以下のナノトルク（ $500\sim 1,000\text{nNm}$ ）の計測分解能に向上させる研究開発は、磁気浮上ステージの非接触支持剛性を 2mN/mm （磁気浮上制御システムの固有振動数を約 10Hz ）に設定することにより、力の分解能が 0.1mN になり、トルク計測分解能を $1,000\text{nNm}$ 以下のレーザー式磁気浮上テーブルを開発することができた。

また、ナノトルク自動制御技術実験としては、磁気浮上ステージの位置制御分解能となる変位計測値のばらつきを $\pm 200\text{nm}$ 以下にすることができ、 x 方向の力の分解能を $0.02[\text{mN}]$ 、 y 方向の力の分解能を $0.03[\text{mN}]$ 、 z 軸まわりトルクの計測分解能を約 $1[\mu\text{Nm}]$ とすることができた。

・ （平成21年度）汎用磁気浮上テーブルの開発・製造/ナノトルク自動制御技術の実験

位置計測分解能 $1[\text{nm}]$ （ $10^{-9}[\text{m}]$ ）、測定範囲 0.1mm の静電式変位センサーを使用し、ステージの質量を 0.15kg 以下とすることにより、計測トルク分解能 $250\sim 500[\text{nNm}]$ を目標とする、静電型変位センサーを使用した磁気浮上テーブルを製作した。

また、ナノトルク自動制御技術実験として「電磁力の非線形特性を補償する効果について検証を行った結果、位置誤差は小さくなり、ステージの z 位置は指示位置とほぼ一致ようになった。

・ （平成22年度）製作した磁気浮上テーブルのトルク計測検証実験/ナノトルク自動制御技術の実験

$10[\mu\text{m}]$ 以下の微小なトルクの計測精度を検証するため、微小トルク試験装置を開発した。

発生するトルクを微小トルク試験装置と磁気浮上ステージで同時に測定し、比較する実験を行った結果、磁気浮上ステージによるトルク計測値が妥当であることがわかった。

また、ナノトルク自動制御技術実験として、力とトルクの計測精度を向上させるために磁気浮上システムの動的パラメータの推定について取り組んだ。逐次最小二乗法により磁気浮上システムの動的パラメータ推定について検討し、最小二乗法によるトルク推定が妥当であると結論できた。

② システム機器の改善、改良（ハード）

・ （平成20年度）磁気浮上テーブルの振動問題に対し3DCAD有限要素により振動解析を行い改善。

初回製作においては浮上時にステージ振動が発生し、ステージが浮上しない問題が発生した、3DCAD有限要素法により振動解析を行いステージ改良することで浮上させることができた。

・ （平成21年度）分光式変位センサーを用いることで体積比1/7の高精度磁気浮上テーブル改善製作。

20年度に開発した「レーザー変位計型磁気浮上テーブル」の改善、改良を目的とし、より高精

度の位置計測分解能1nm(0.001 μ m)を持つ分光干渉型変位計を使用することにより、位置制御分解能10～50nmと高精度で小型の磁気浮上テーブルの開発を行った。

- ・ (平成22年度) 実際に使用した現場のニーズを加味しインターフェイスを改善。

改良されたインターフェイスプログラムにより、以下の全ては操作画面に表す事ができるようになった。

①現場作業者にステージの位置を0.1 μ m刻みで表示する。

②現場作業者にステージの切削力を0.1mN刻みで表示する。

③現場作業者にステージの切削トルクを0.1 μ Nm刻みで表示する。

④現場作業者にステージの位置、切削力と切削トルクの計測サンプル周期を0.009～0.01秒で表示する。

⑤現場作業者の必要に応じて、切削力と切削トルクに関する1000～10000個の数値データをハードディスクなどの記録媒体に保存できるようにする。

【2】システム構築の研究（ハード・ソフト開発）

- ・ (平成20年度) 刃先位置画像検出装置の開発/操作プログラム、操作フローチャート開発

システム構築の研究のハード開発については、加工準備段階のシステム＝「刃先位置画像検出装置」のプロトタイプ機の製作を行い目標値以上の直径10 ミクロンの微細工具の刃先位置の確認が可能となった事を確認した。

また、システム構築の研究のソフト開発としては「加工素材の位置設定方法の考案」・「10 ミクロンの微細工具刃先の位置検出が可能な光学機器」「微小工具チャッキングの良否判定の確認方法の確立」の確認ができ、加工準備段階の操作フローチャートが作成できた。さらに、「磁気浮上テーブル上の加工素材の位置検出」と「微細工具刃先の位置検出」の2点を融合するための手法を考案した。

- ・ (平成21年度) 刃先位置画像検出装置の改良、体積1/3実現/微細切削加工支援アルゴリズムの開発

20年度のプロトタイプ機の体積と比較して1/3の大きさの「小型刃先位置画像検出装置」を完成させた。また、システム構築研究のソフト開発としてはシステム化のための操作アルゴリズムを構築し、その操作性を実際の現場で、現場作業者とともに検証した。また作業者とのインターフェイスプログラムのバグの有無を確認、修正箇所改善を行った。

- ・ (平成22年度) インターフェイスプログラム改善、トラブル時操作手法の確立。

システム構築研究のソフト開発として、昨年に引き続きシステムの操作性を実際の現場で、現場作業者とともに検証し、そこで問題となって浮上してきた磁気浮上テーブルの立ち上げ作業時のトラ

ブル回避方法を考案しマニュアル化した

【3】微細加工基礎データベース研究

① 微小穴加工データベース構築

- ・ (平成20年度) 磁気浮上テーブルと刃先位置画像検出装置で各種微細ドリルのトルク検出実験
開発した磁気浮上テーブルと刃先位置画像検出装置を用いて100 μ m以下の各種微細ドリル加工時におけるトルク検出実験を行った。
- ・ (平成21年度) 各種素材に50 μ m～10 μ mのドリル加工実験を行い基礎データを作成した。
アルミ合金や、真鍮、ステンレスSUS、タンタル素材の他ガラス素材に50 μ m～10 μ mの微細ドリルを用いてトルク検出するとともにデータベースの為の基礎データ実験を行った。
- ・ (平成22年度) 微細加工データベース作成の為、各種実験検証を行った。
微細加工の基礎データとして以下の研究を行った。
 - ①微細加工データベースの基礎として、100 μ m以下の微細工具の問題点の検証、
 - ②最適回転数、最適ステップ送り量、最適送り速度の検証実験。
 - ③ドリル加工時におけるスラスト荷重と加工トルクを採取し、統計処理にて確率分布図に表す手法研究。
 - ④SUS304材、NAK55材、A5052材、BSBM2材の100 μ m～10 μ mの微細加工データベースと微細加工用マクロプログラムを作成した。

4 当該プロジェクト連絡窓口

総括研究代表者 (P L) : 有限会社大阪製作所

: 代表取締役社長 後藤 良一

: 〒581-0853 八尾市楽音寺 5-137

: 電話 0729-41-1813 : FAX 0729-41-8630

業務者管理者

: 財団法人大阪産業振興機構

: 経理担当 クリエイション・コア東大阪産学連携推進課 課長補佐 八幡谷 憲治
業務管理 事業局長 矢野 光 伸

: 〒577-0011 東大阪市荒本北 1-4-1 クリエイション・コア東大阪内

: 電話 06-6748-1023 : FAX 06-6745-1162

第2章 本 論

1 概要と目的

直径 100 ミクロン以下の微小切削工具を使用する微細加工が、電子機器部品や小型の医療検査機器などの製作に活用されようとしている。しかし微細切削加工での微細穴加工では切りくずの排出不良や切削工具の折損などの問題点が多いことが指摘され、工具欠損や折損の不安が常にあり微細金型製造や微細加工時の低コスト化、短納期化への大きな妨げとなっている。そのため、微細加工における切削トルクをモニタリングし加工条件を数値化するシステムの開発が求められている。

従来、直径 100 ミクロン以下の微小ドリルに発生する微小な力は通常の工具よりも非常に小さく、摺動部を有する位置制御ステージでは、力とトルクを計測・制御することは不可能である。

しかし、本研究で用いる「磁気浮上ステージ」は完全非接触でステージを支持し、6 自由度の位置・姿勢を制御可能なので、微小な切削工具に作用する力とトルクを計測し制御することが可能である。現在、世界中でも直径 100 ミクロン以下の微細加工ドリルの加工時に発生する微細トルクを計測しながら「微細切削加工技術ノウハウ構築支援システム」の実現を目指しているのは我々だけだと自負しながら、このシステムを用いて「微細切削加工技術ノウハウ」を明らかにすることで「ノウハウ構築支援システム開発」という目標を達成させ、微細加工技術ノウハウ構築に対する川下産業の強い要請に大きく貢献することを目的としている。(図 2-1)

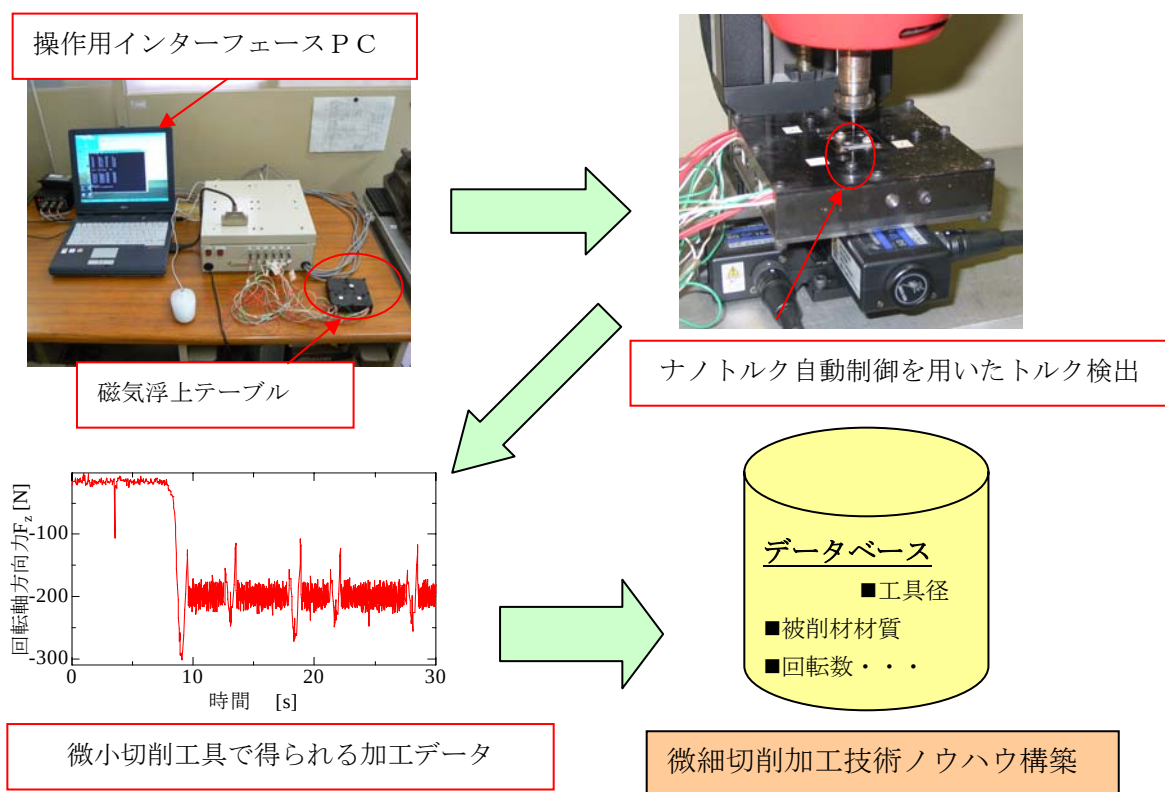


図 2-1

2 研究内容および成果

【1】ナノトルク自動制御技術の研究（ハード開発）

① ナノトルク自動制御技術の実験と検証

・ （平成20年度）高精度磁気浮上テーブルの開発・製造/ナノトルク自動制御技術の実験

従来のトルク計測分解能 $10\mu\text{Nm}$ を $1\mu\text{Nm}$ 以下のナノトルク（ $500\sim 1,000\text{nNm}$ ）の計測分解能に向上させる研究開発は、磁気浮上ステージの非接触支持剛性を 2mN/mm （磁気浮上制御システムの固有振動数を約 10Hz ）に設定することにより、力の分解能が 0.1mN になり、トルク計測分解能を $1,000\text{nNm}$ 以下のレーザー式磁気浮上テーブルを開発することができた。また、ナノトルク自動制御技術実験としては、磁気浮上ステージの位置制御分解能となる変位計測値のばらつきを $\pm 200\text{nm}$ 以下にすることができ、 x 方向の力の分解能を $0.02[\text{mN}]$ 、 y 方向の力の分解能を $0.03[\text{mN}]$ 、 z 軸まわりトルクの計測分解能を約 $1[\mu\text{Nm}]$ とすることができた。（図2-【1】-①-1）



図 2-【1】-①-1 磁気浮上システム全体

・ （平成21年度）汎用磁気浮上テーブルの開発・製造/ナノトルク自動制御技術の実験

位置計測分解能 $1[\text{nm}]$ （ $10^{-9}[\text{m}]$ ）、測定範囲 0.1mm の静電式変位センサーを使用し、ステージの質量を 0.15kg 以下とすることにより、計測トルク分解能 $250\sim 500[\text{nNm}]$ を目標とする、静電型変位センサーを使用した磁気浮上テーブルを製作した。（図2-【1】-①-2）



(図2-【1】-①-2 静電型変位センサーを用いた磁気テーブル)

- (平成22年度) 製作した磁気浮上テーブルのトルク計測検証実験/ナノトルク自動制御技術の実験

10[μ m]以下の微小なトルクの計測精度を検証するため、微小トルク試験装置を開発した。

発生するトルクを微小トルク試験装置と磁気浮上ステージで同時に測定し、比較する実験を行った結果、磁気浮上ステージによるトルク計測値が妥当であることがわかった。また、ナノトルク自動制御技術実験として、力とトルクの計測精度を向上させるために磁気浮上システムの動的パラメータの推定について取り組んだ。逐次最小二乗法により磁気浮上システムの動的パラメータ推定について検討し、最小二乗法によるトルク推定が妥当であると結論できた。(図2-【1】-①-3)



(図 2-【1】-①-3 微小トルク試験機)

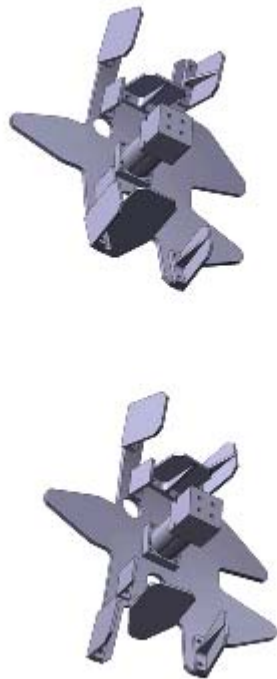
② システム機器の改善、改良（ハード）

- ・ （平成20年度）磁気浮上テーブルの振動問題に対し3DCAD有限要素により振動解析を行い改善。

初回製作においては浮上時にステージ振動が発生し、ステージが浮上しない問題が発生した、3DCAD有限要素法により振動解析を行いステージ改良することで浮上させることができた。

（図2-【1】-②-1）

図2-【1】-②-1



（図2-【1】-②-1 3DCAD有限要素法による振動解析）

- ・ （平成21年度）分光式変位センサーを用いることで体積比1/7の高精度磁気浮上テーブル改善製作。
20年度に開発した「レーザー変位計型磁気浮上テーブル」の改善、改良を目的とし、より高精度の位置計測分解能1nm(0.001 μ m)を持つ分光干渉型変位計を使用することにより、位置制御分解能10～50nmと高精度で小型の磁気浮上テーブルの開発を行った。（図2-【1】-②-2）



(図2-【1】-②-2 高精度小型分光式変位センサー磁気浮上テーブル)

- ・ (平成22年度) 実際に使用した現場のニーズを加味しインターフェイスを改善。

改良されたインターフェイスプログラムにより、以下の全ては操作画面に表す事ができるようになった。(図2-【1】-②-3)

- ①現場作業者にステージの位置を $0.1\mu\text{m}$ 刻みで表示。
- ②現場作業者にステージの切削力を 0.1mN 刻みで表示。
- ③現場作業者にステージの切削トルクを $0.1\mu\text{Nm}$ 刻みで表示。
- ④現場作業者にステージの位置、切削力と切削トルクの計測サンプル周期を $0.009\sim 0.01$ 秒で表示。
- ⑤現場作業者の必要に応じて、切削力と切削トルクに関する $1000\sim 10000$ 個の数値データをハードディスクなどの記録媒体に保存できるようにする。

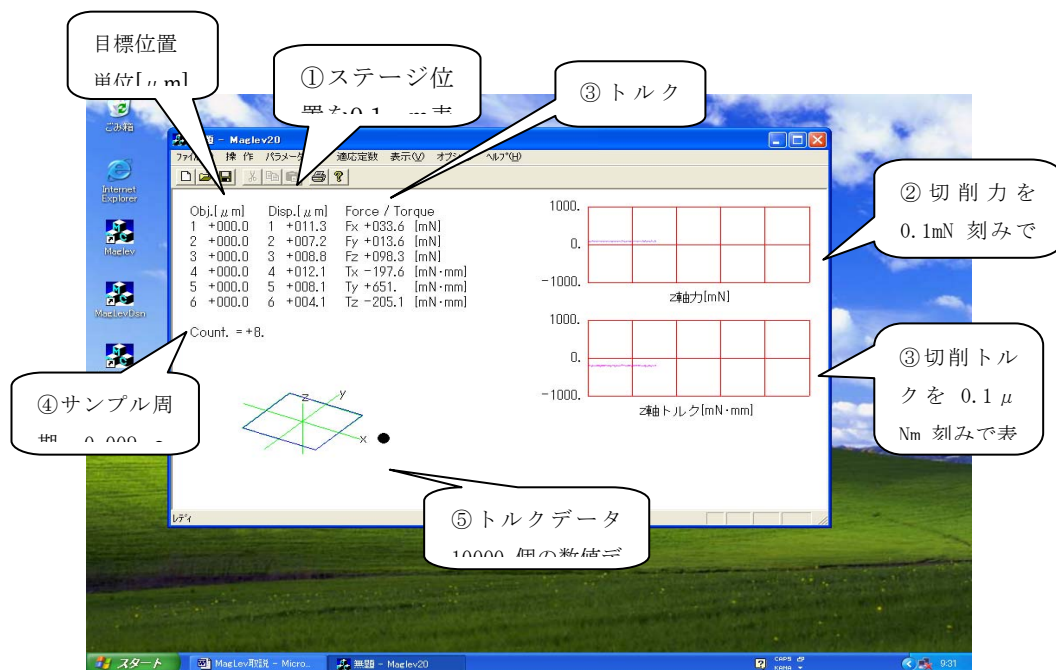
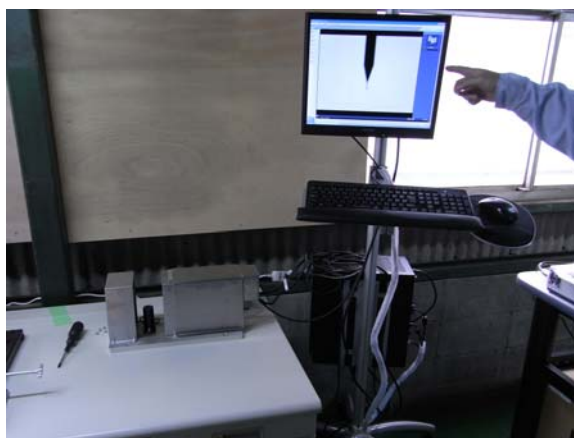


図2-【1】-②-3 改良されたプログラムの操作画面

【2】システム構築の研究（ハード・ソフト開発）

・ （平成20年度）刃先位置画像検出装置の開発/操作プログラム、操作フローチャート開発

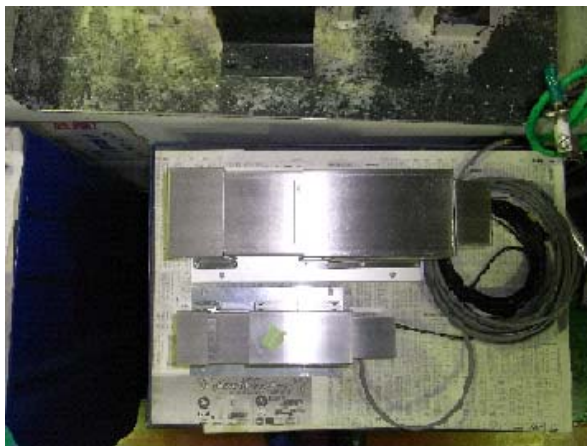
システム構築の研究のハード開発については、加工準備段階のシステム＝「刃先位置画像検出装置」のプロトタイプ機の製作を行い目標値以上の直径10 ミクロンの微細工具の刃先位置の確認が可能となった事を確認した。（図2-【2】-1）また、システム構築の研究のソフト開発としては「加工素材の位置設定方法の考案」・「10 ミクロンの微細工具刃先の位置検出が可能な光学機器」「微小工具チャッキングの良否判定の確認方法の確立」の確認ができ、加工準備段階の操作フローチャートが作成できた。さらに、「磁気浮上テーブル上の加工素材の位置検出」と「微細工具刃先の位置検出」の2点を融合するための手法を考案した。



（図2-【2】-1 刃先位置画像検出装置）

・ （平成21年度）刃先位置画像検出装置の改良、体積1/3実現/微細切削加工支援アルゴリズムの開発

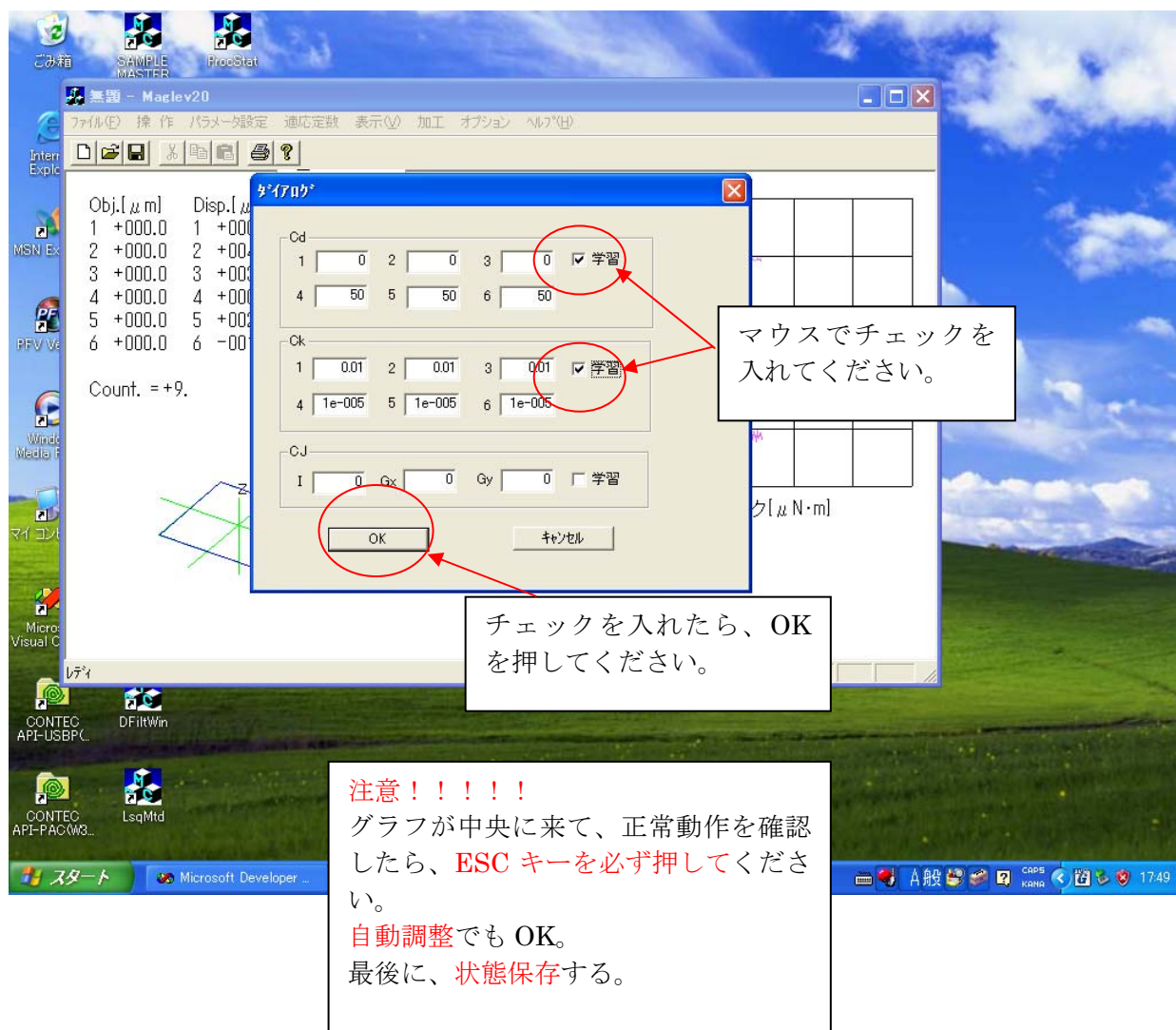
20年度のプロトタイプ機の体積と比較して1/3の大きさの「小型刃先位置画像検出装置」を完成させた。（図2-【2】-2）



（図2-【2】-2 小型化された刃先位置画像検出装置）

- ・ (平成22年度) インターフェイスプログラム改善、トラブル時操作手法の確立。

システム構築研究のソフト開発として、昨年に引き続きシステムの操作性を実際の現場で、現場作業者とともに検証し、そこで問題となって浮上してきた磁気浮上テーブルの立ち上げ作業時のトラブル回避方法を考案しマニュアル化した (図2-【2】-3)



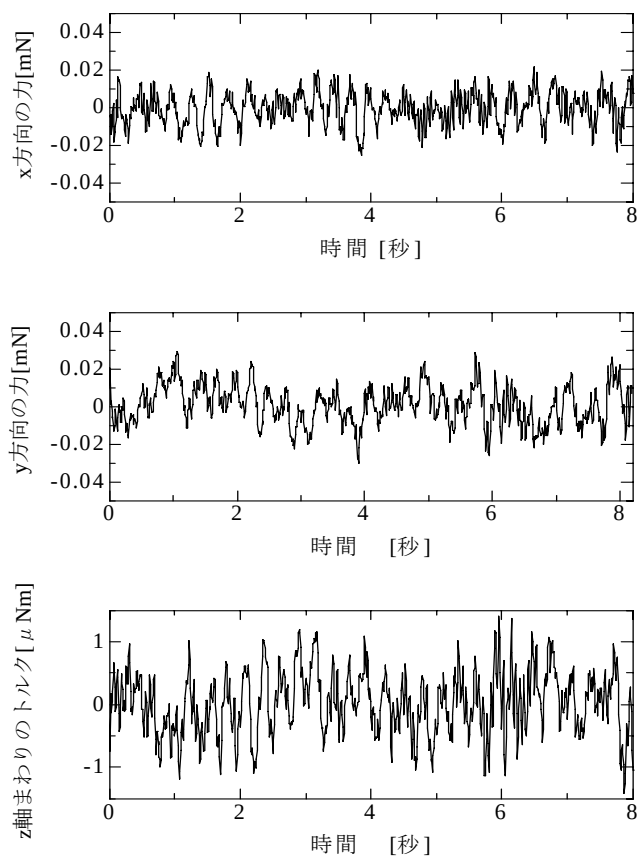
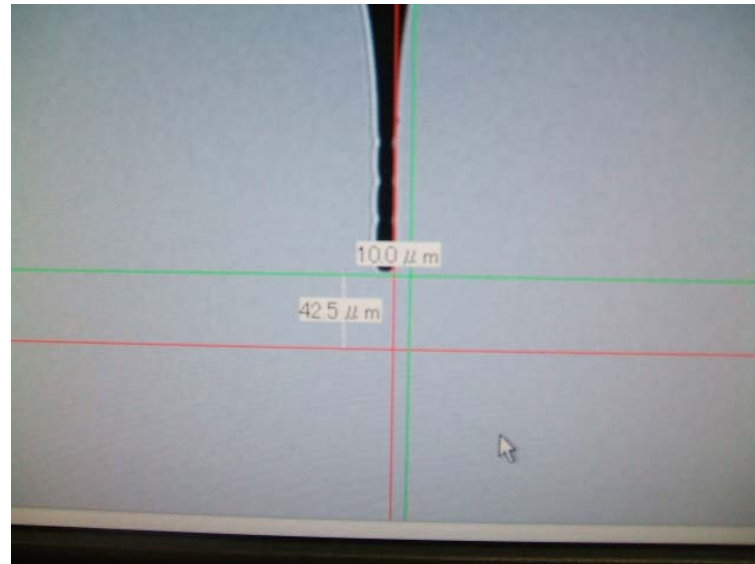
(図2-【2】-3 トラブル時操作マニュアル)

【3】微細加工基礎データベース研究

① 微小穴加工データベース構築

- ・ (平成20年度) 磁気浮上テーブルと刃先位置画像検出装置で各種微細ドリルのトルク検出実験

開発した磁気浮上テーブルと刃先位置画像検出装置を用いて $100\mu\text{m}$ 以下の各種微細ドリル加工時におけるトルク検出実験を行った。(図2-【3】-①-1)

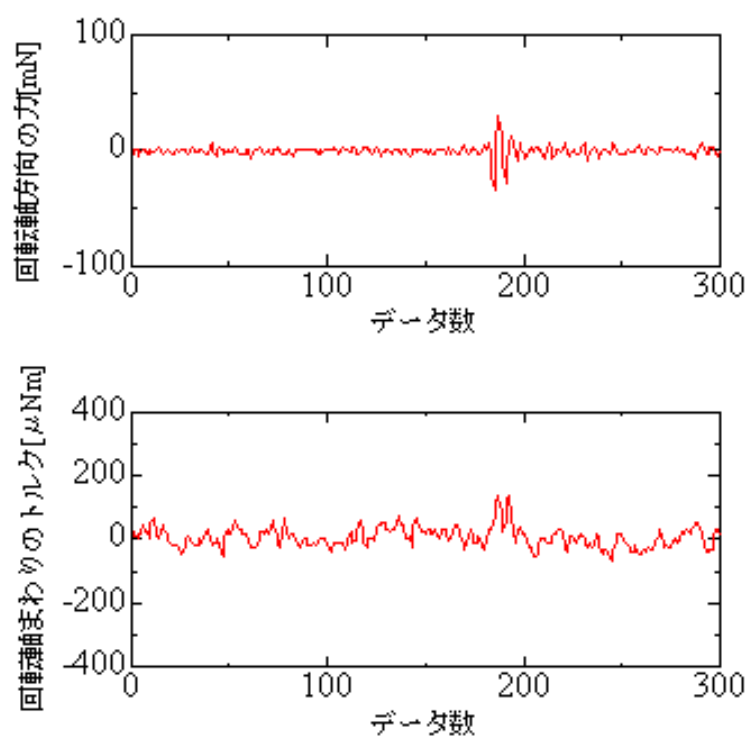
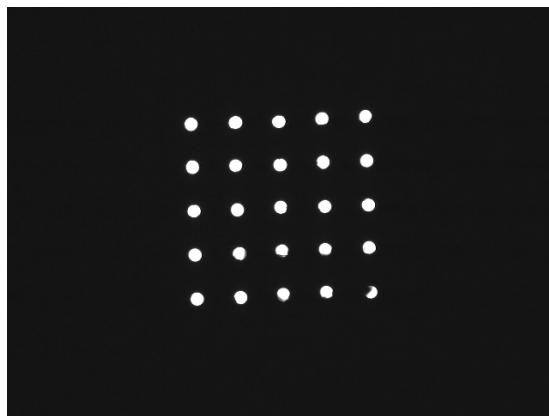


(図2-【3】-①-1 刃先画像検出装置の画面とトルク検出図)

- ・ (平成21年度) 各種素材に $50\mu\text{m}$ ～ $10\mu\text{m}$ のドリル加工実験を行い基礎データを作成した。

アルミ合金や、真鍮、ステンレスSUS、タンタル素材の他ガラス素材に $50\mu\text{m}$ ～ $10\mu\text{m}$ の微細ドリルを用いてトルク検出するとともにデータベースの為の基礎データ実験を行った。

(図2-【3】-①-2)

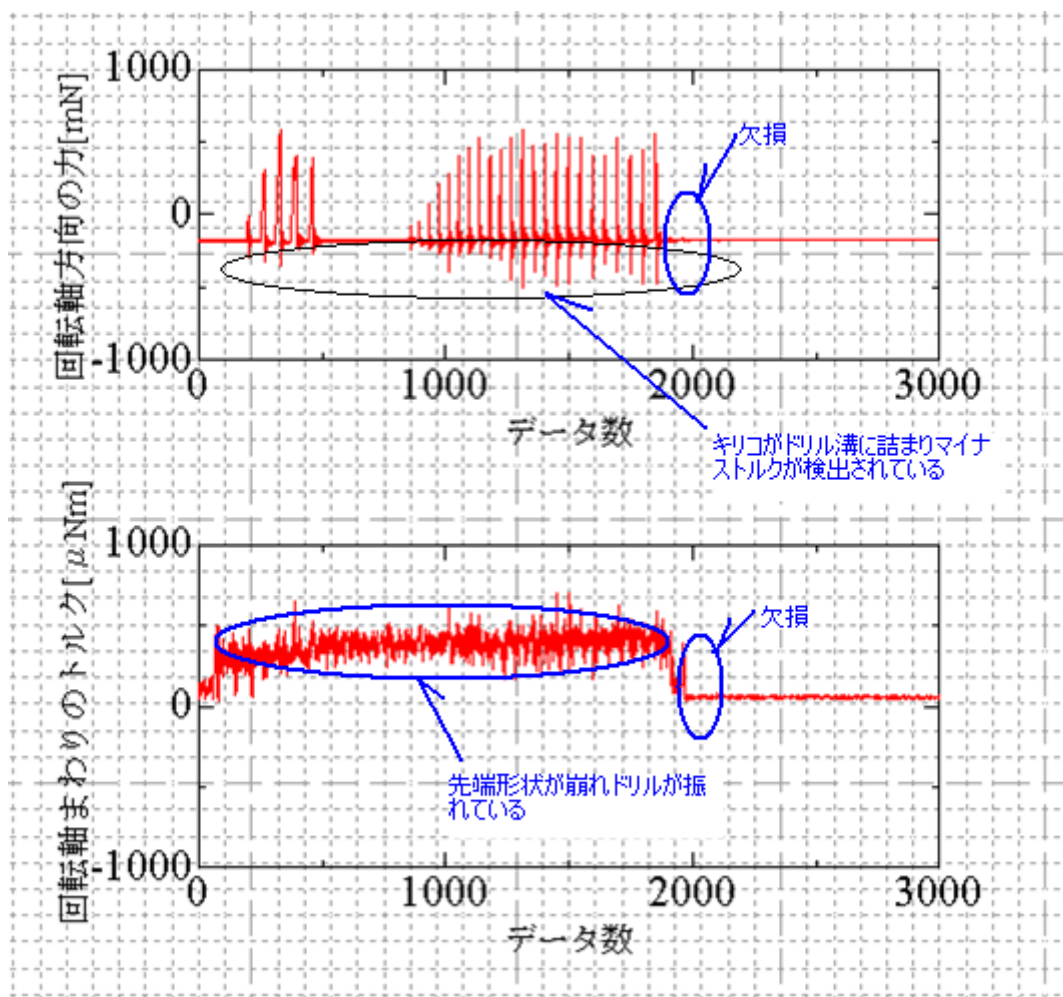
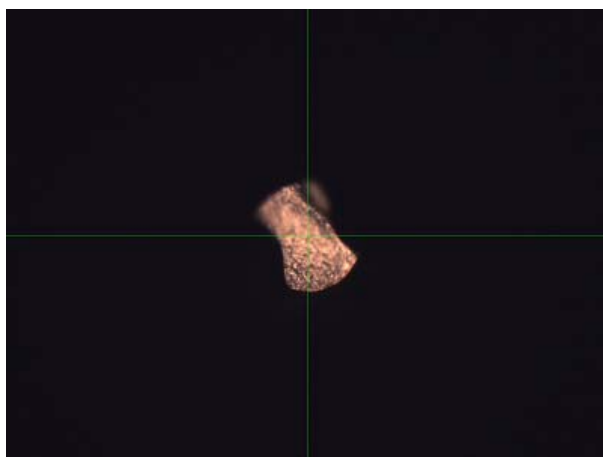


(図2-【3】-①-2 $50\mu\text{m}$ 穴加工とトルク検出図)

- ・（平成22年度）微細加工データベース作成の為、各種実験検証を行った。

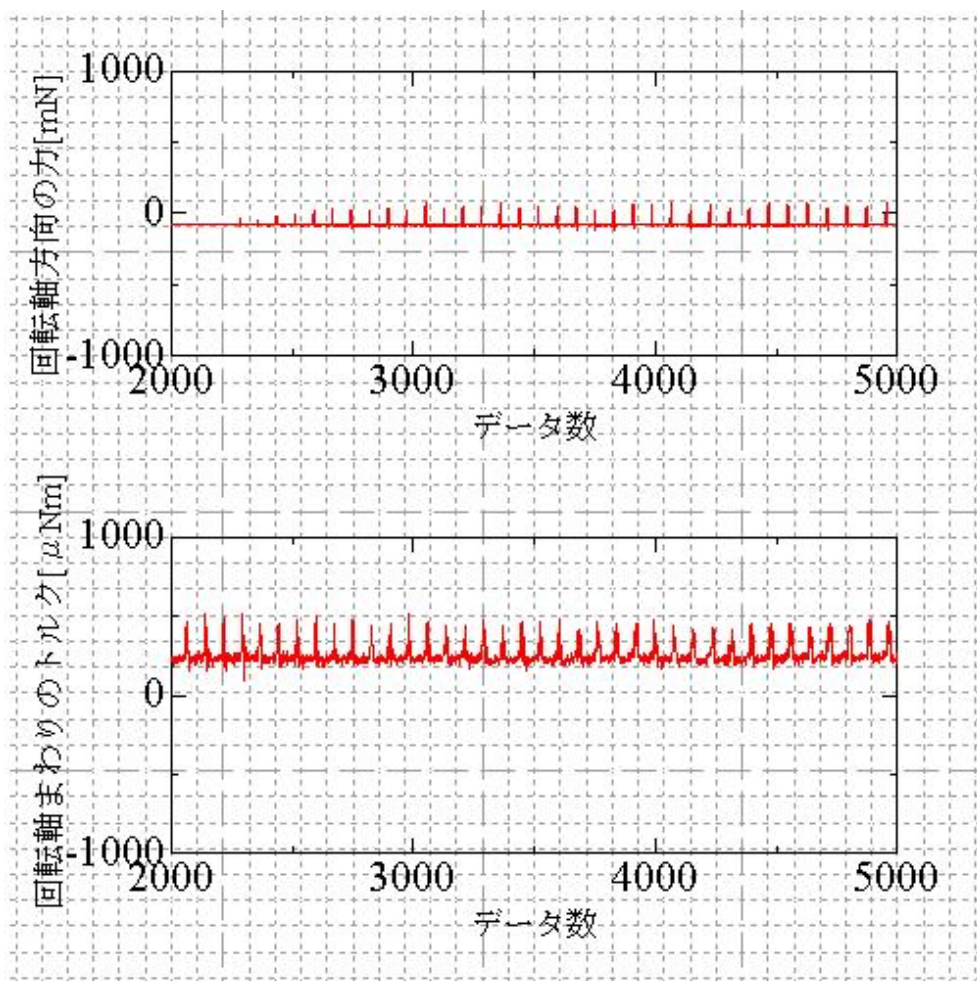
微細加工の基礎データとして以下の研究を行った。

- ① 微細加工データベースの基礎として、 $100\mu\text{m}$ 以下の微細工具の問題点の検証を行い、問題点を明らかにした。（図2-【3】-①-3）



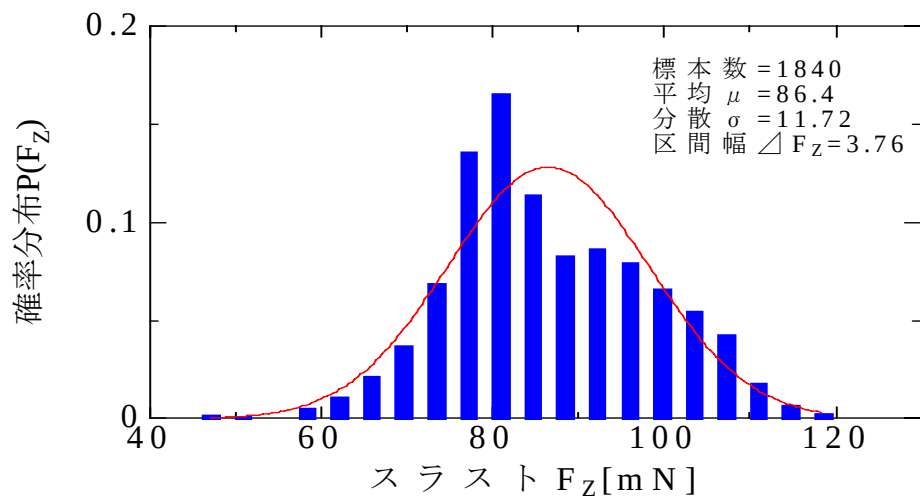
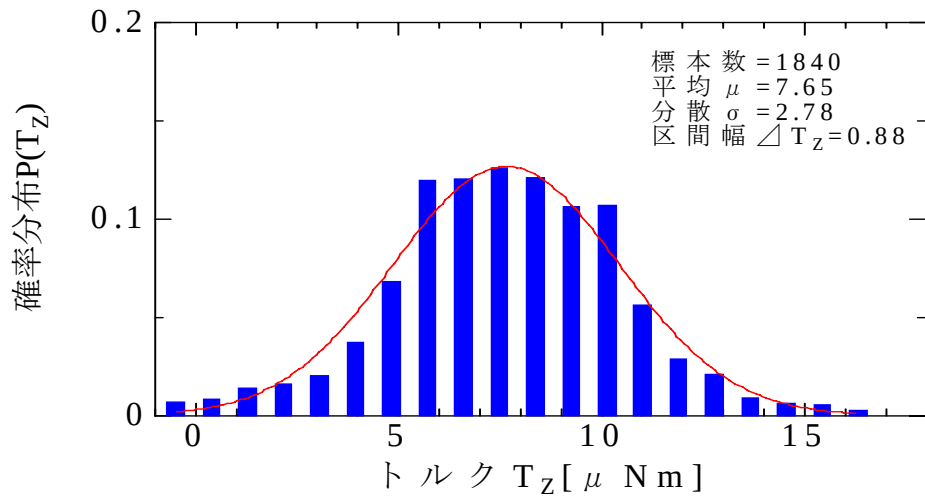
（図2-【3】-①-3 ドリルの先端部画像とドリル欠損時のトルク検出図）

- ② 最適回転数、最適ステップ送り量、最適送り速度の検証実験を行い、安定領域でのトルク検出と不安定領域でのトルク検出を行いその差を明らかにした。（図2-【3】-②）



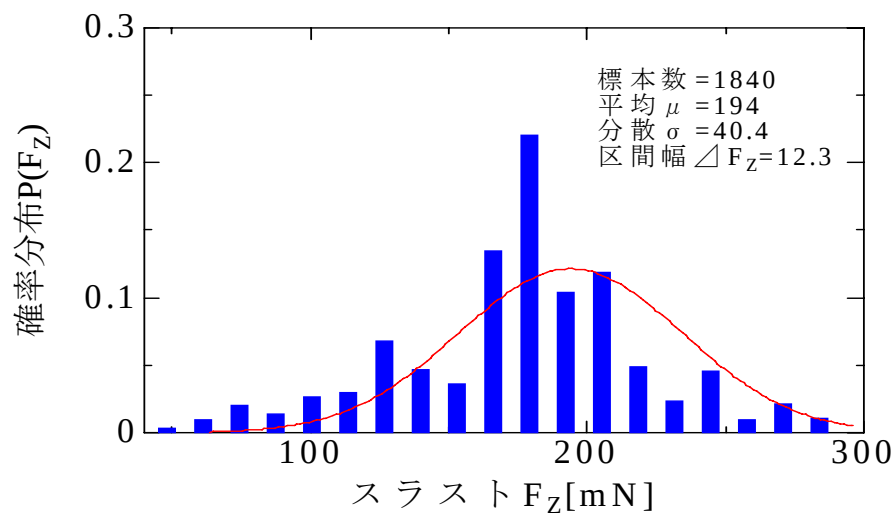
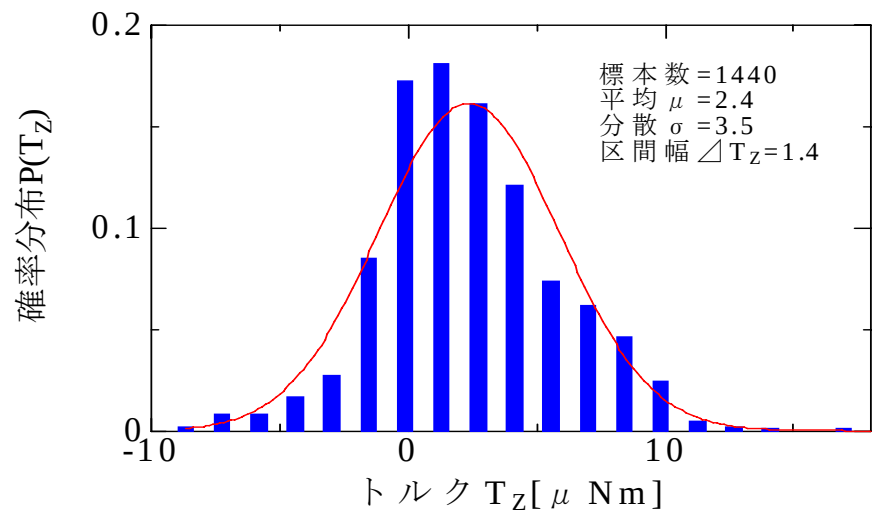
(図2-【3】-② 安定加工領域のドリル先端画像と安定領域でのトルク検出)

- ③ ドリル加工時におけるスラスト荷重と加工トルクを採取し、統計処理にて確率分布図に表す手法研究をおこない、確率分布図に表す手法を考案した。(図2-【3】-③-1) (図2-【3】-③-2) (図2-【3】-③-3)



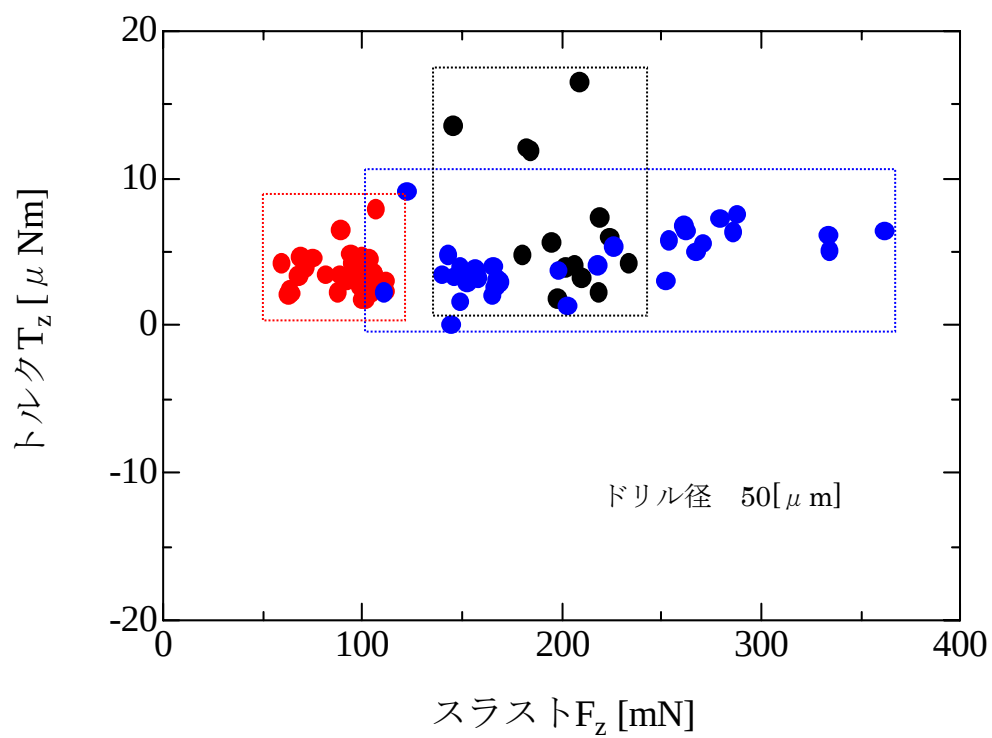
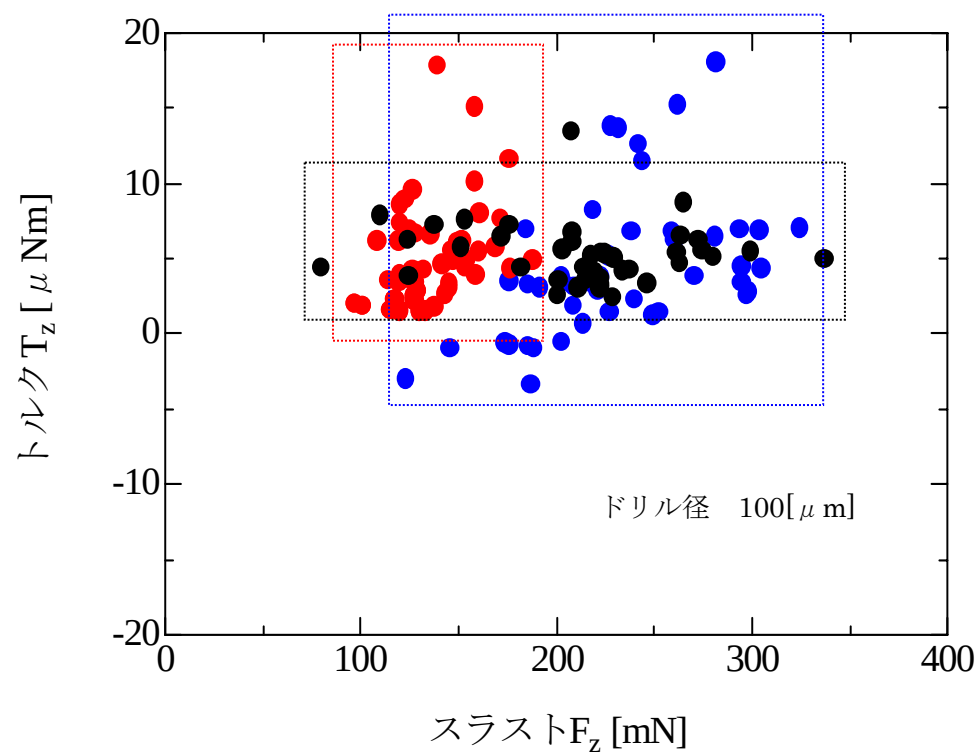
ドリル径 : 100 [$\mu \text{ m}$] 被削材 : 鋼

(図2-【3】-③-1 100 $\mu \text{ m}$ ドリル加工トルクの確率分布図(鋼))



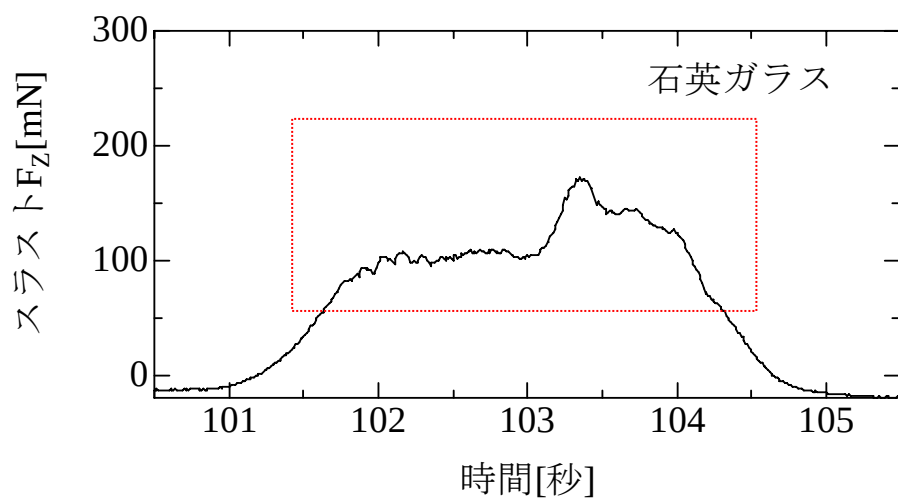
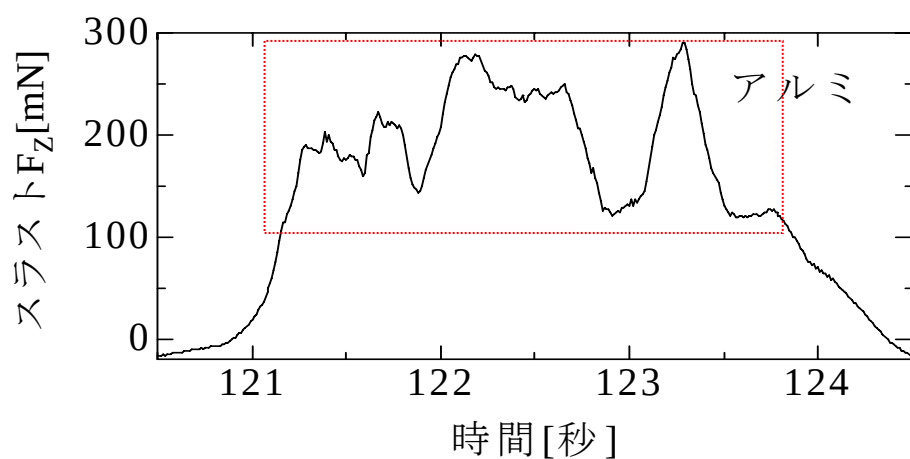
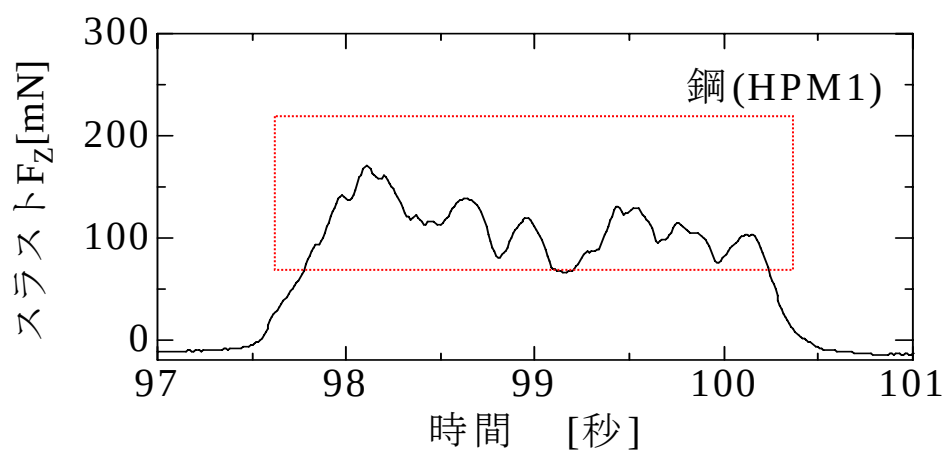
ドリル径 : 100 [μ m] 被削材 : アルミ

(図2-【3】-③-2 100 μ mドリル加工トルクの確率分布図 (アルミ))



(図2-【3】-③-3 各種素材別トルク分布図)

④ SUS304材、NAK55材、A5052材、BSBM2材、石英ガラスの $100\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ の微細加工データベースと微細加工用マクロプログラムを作成した。（図2-【3】-④）

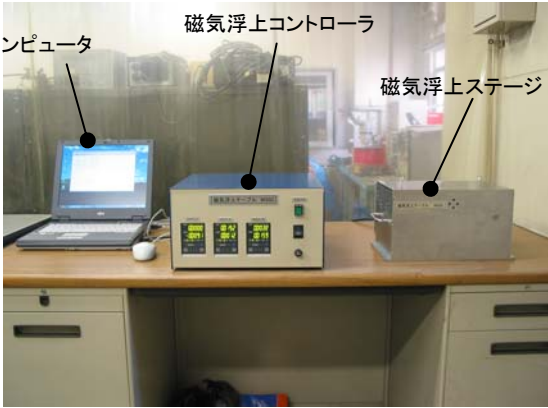


（図2-【3】-④）

第3 最終章 全体総括

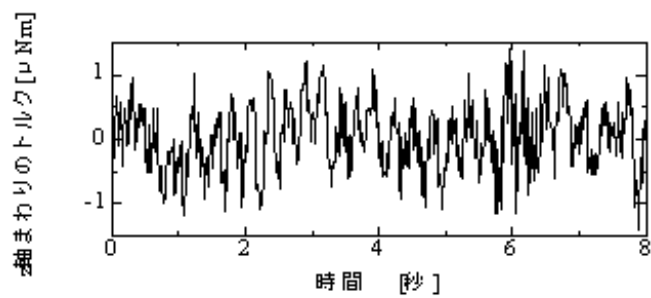
まとめ

本研究は、完全非接触でステージを支持し、6 自由度の位置・姿勢を制御可能な「磁気浮上テーブル」を開発し（図3-1）、さらに微細加工の準備段階で必要な「刃先画像検出装置」も開発した。

	
高精度磁気浮上テーブル	静電型変位センサー磁気テーブル
	
高精度小型分光式変位センサー磁気浮上テーブル	小型化刃先位置画像検出装置

(図3-1)

微細加工時におけるトルク計測技術も、1年目の単にトルクが検出でき、初めてグラフに表せたレベルから、（図3-2）



（図3-2）

3年目には、微細ドリルが受けるトルクを完全にグラフ化し、更に統計手法を用いた確率分布図に表せる方法も考案した。（図3-3）

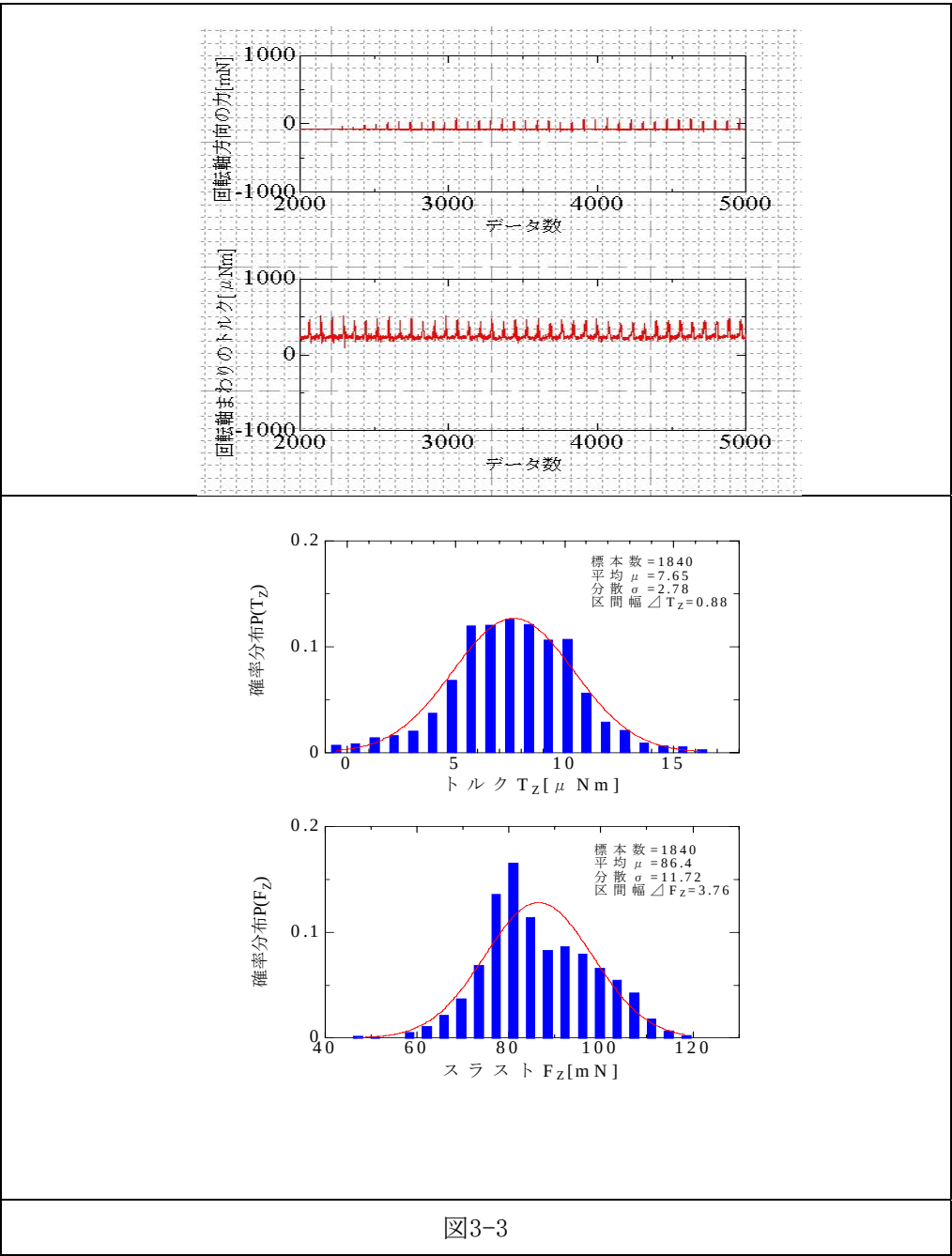


図3-3

そして、完成した磁気浮上テーブルのトルク計測精度を検証する為に、「微小トルク試験装置」を開発し、微小トルク試験装置と磁気浮上ステージで同時にトルク測定し比較する実験を行い磁気浮上ステージによるトルク計測値が妥当である事の検証も行った。（図3-4）

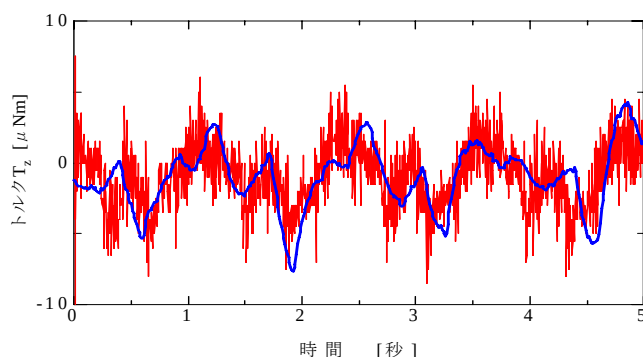


図3-4 微小トルク試験装置との比較

また、これらの機器を用いて実際に現場で加工を行い

- ・ 準備段階でドリルのチャッキング“ぶれ”を1 μm 以内にするノウハウ。
- ・ 50 μm 以下の微細工具には工具側にも問題があり、工具メーカー選定のノウハウ
- ・ 微細加工時における安定加工領域を見分けるノウハウ
- ・

開発した機器を用いてこれらのなどのノウハウを構築できた、このことにより「微細切削加工技術ノウハウ構築支援システム」として十分役立つことが証明できた。

これらの結果から、高度化目標を達成するために必要とした「微細切削加工トルク計測技術の確立」と「微細加工ノウハウ構築システムの構築」という目標は達成された。

研究開発後の課題としては、大阪製作所に現在 マツダ(株)（車メーカー 本社広島）や、ノズルメーカーから量産の微細穴加工製品の見積依頼や試作依頼が来ているので、まずは大阪製作所で本システムを用いて微細穴加工製品の量産化を実現させる事が最大の課題である。

次年度以降の、事業化計画については、研究開発を始めた2008年目に「リーマンショック」があり大阪製作所もその影響を受け業績の悪化を招いたが、研究開発をやめることはしなかったので大きな欠損を出すに至った。現在は、業績も戻りつつ有り前述の微細穴加工製品量産化の動きも有るので明るい話題は多いが、新規の事業には慎重にならざるをえない。そのため事業化については来年度以降に見直しを行う予定である。まずは、従来受注できなかった微細穴加工製品の量産化受注に成功し事業として軌道に乗せることを最大の目標としたい。