

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420044

研究課題名(和文)高精度、高速加工が可能な小型工作機械を実現する変形補正および振動吸収法の研究

研究課題名(英文) Study on deformation compensation and vibration absorption method to develop small machine tools capable of high precision and high speed machining

研究代表者

立矢 宏 (TACHIYA, HIROSHI)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：10216989

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、設置容積が530mm立方と汎用機の1/2程度の大きさでありながら、高精度な鋼材切削が可能な小型3軸NCフライスを開発した。同フライスは、ベースを複数の工作機械で共有することを前提に、案内面、コラムなどの小型化を実現した。また、小型化にともなう剛性低下に起因する機体変形を、切削力から予測して工具経路を補正する方法を提案して制御系に組み込み、SS400の切削において加工誤差を数 $\mu\text{m}$ に抑制した。また、振動抑制法として圧電素子を利用して、振動とは直交方向に断続的な衝撃力を構造に加えることで減衰能が増加することを確認し、その効果は圧電素子に生ずる電流値に関連することを見いだした。

研究成果の概要(英文)：This research has developed a compact triaxle NC milling machine with high precision steel cutting, the volume of which is about half the size of general ones. By sharing the base with plural machine tools, the proposed one has miniaturized its structure. The reduction in size results in the reduction in rigidity and induces the deformation of the machine tool. In order to suppress the machining errors, a method to correct the tool path by predicting the deformation of the machine tool has been proposed. The proposed method can reduce the machining error to several  $\mu\text{m}$  in the cutting of SS400. Additionally, a vibration absorption method with a piezoelectric element was proposed. The method applies intermittent impact to the structure in a direction orthogonal to the vibration. By hammering test with a cantilever, we confirmed the damping capacity increases. As the method needs no complex control, it can be expected to suppress the chatter vibration of machine tools

研究分野：機械設計

キーワード：小型工作機械 コンパクトライン デスクトップファブリッシング NCフライス 機体変形補正 高精度加工 振動抑制 圧電素子

1. 研究開始当初の背景

工業製品の小型化は著しいが、その製造に使用される工作機械は図1に◇で示すように1.5m<sup>3</sup>以上と大型である。よって、生産ラインには広い面積を必要とし、また、その設置や運用に高い費用を要する。一方、デスクトップファブリッシングなど、卓上での製品製造への注目が集まっているが、それらは図1に○で示すように鋼材切削に必要な一般的な出力1.3kWを満たしていない。

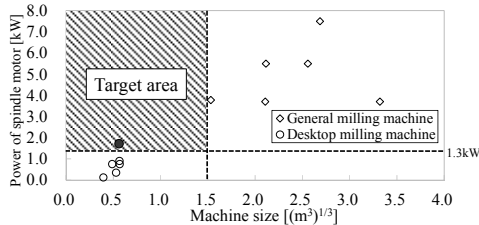


図1 工作機械の寸法と出力との関係

2. 研究の目的

- (1) 工作機械を小型化できれば、生産設備全体の省スペース化が行え、設置が容易になるだけでなく、省エネルギー化も期待でき、多品種変量生産に適したコンパクトラインを実現できる。そこで、本研究では現行の卓上機に匹敵する大きさで、かつ、鋼材切削が可能な、図1の網掛け領域に該当する仕様を持つ小形工作機械を開発する。
- (2) 開発する工作機械は、小型ながら鋼材切削を可能とすることが目的である。しかし、小型化にともない、剛性低下は避けられない。そこで、ある程度の剛性低下は許容し、その結果生じ得る機体の変形誤差を補正する手法を確立する。
- (3) 加工精度に影響する現象として、びびり振動の発生も予想される。そこで、圧電素子による打撃によって、びびり振動を抑制する手法を提案する。

3. 研究の方法

- (1) 工作機械の小型化設計として、本研究ではベース共有形的工作機械を検討する。予備実験などの結果から、工作機械の剛性確保や、変形補正のためには、少なくともベース部分の剛性が必要との結論に至った。そこで、ベースは十分な剛性を確保した大型の設置台などとし、そのうえに小型化した工作機械を複数台設置してコンパクトラインを実現可能とする。
- (2) 小型化にともなう剛性低下への対応としては、機体の変形を切削荷重などから予測して工具位置の補正を行うことを可能として加工の高精度化を図る。
- (3) びびり振動の抑制に対しては、圧電素子を用いた手法を検討する。本研究では、超音波振動を励起した圧電素子を対象物に断続的に接触させ、その結果、生ずるすべり摩擦によって、複雑な制御などを用いずに簡便に振動を減衰させる方法を検討する。

4. 研究成果

(1) 先述のように本研究では小型工作機械の新しい構造として、ベース共有形構造を提案する。本構造は、図2に示すように、可能な限り小型化した主軸やテーブルからなる複数の工作機械を高剛性なベース上に集積する構造である。これにより、ベース上の各構造には必要に応じて適切な剛性を設定できる。また、加工機を密集して配置できるため、空間あたりの生産性向上も期待できる。

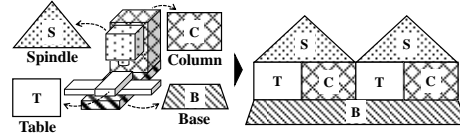


図2 ベース共有形工作機械の概略

以上の概念に基づく小形工作機械として、その目標仕様をスマートフォン程度の小型製品の製造を対象に、SS400材の切削が工具径φ3~6mmで可能であることとした。

以上の目標仕様に対して、スピンドルには、モータと一体化したモータビルトインスピンドルを使用して小型化をはかった。XYテーブルには、一般的なLMガイドに比べて低剛性ではあるが簡易かつ占有空間が少ないクロスLMガイドを用いた。Z軸送り機構にはステッピングモーター一体型ボールねじを利用し、直線運動機構であるボールスプライン、運動案内面の役割を担うスライドシャフトおよびそれを支持するすべり軸受により図3に示すように構成した。なお、スピンドル、スピンドルブラケットおよびスライドシャフトの締結にはシュパンリングを使用した。本機構は、案内面にすべり軸受を使用したことで、いずれの方向の荷重に対しても高い剛性を有する。さらに、1本のボールねじで駆動する片側駆動を採用したことで、回転伝達機構が不要となり構造の小型化を実現した。ついで、以上のZ軸送り機構を搭載可能な門型コラムの設計を行った。その外形を図4に示す。本コラムは、組み立て性および剛性を考慮し、アルミフレームをリブで締結する構造とした。また、門型フレームを2つ平行に配置した構造にすることでZ軸送り機構の搭載を可能にした。

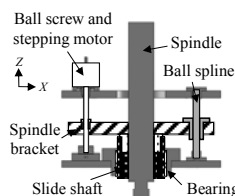


図3 Z軸送り機構

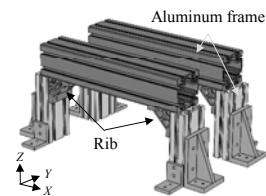


図4 コラム構造

以上の設計に基づき製作した試作機を図5、仕様を表1に示す。試作機は、機体設置空間が約530<sup>3</sup>mm<sup>3</sup>と汎用機の半分以下、スピンドル出力は鋼材切削が可能な1.57kWとなり、図1に●で示す目標領域内の能力を達成した。

なお、本機体のベースには剛性および精度の保証が容易な定盤を使用した。また、 $X$ 軸のストローク量は目標値に達していないため、さらに改良が必要である。

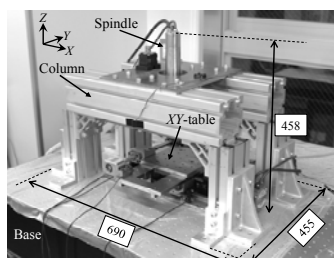


図5 試作機

表1 試作機の仕様

Size[mm <sup>3</sup> ]	530 <sup>3</sup>	
Usable rotation range[rpm]	2000~15000	
Torque[N・mm]	580	
Tool swinging accuracy[μm]	Under 5	
Stroke[mm]	X-axis	60
	Y-axis	160
	Z-axis	50

製作した小型工作機械の性能を評価するため、静的な運動性能の指標となる直角度、真直度および位置決め精度、さらに、加工性能の直接的な指標となる工作精度を測定した。

まず、直角度の測定結果について述べる。直角度は、各運動軸の直角からの狂いの大きさを意味する。試作機における $X$ および $Y$ 軸の直角度は、一方の軸と平行に設置した直角マスタに対する、もう一方の軸の平行度をダイヤルゲージにより測定することで評価した。また、 $X$ 、 $Y$ 軸に対する $Z$ 軸の直角度は、スピンドル先端に固定したダイヤルゲージをテーブル上に設置した直角マスタに沿って滑らせることにより測定した。その結果、 $X$ および $Y$ 軸の直角度は、誤差が $10\mu\text{m}$ 以内に収まり高い直角性を確認できた。しかし、 $Z$ 軸は $X$ 軸に対して約 $90\mu\text{m}$ 傾いていたため、加工時に補正が必要であることを確認した。

次に、真直度の測定結果を述べる。真直度は、直進運動すべき運動部品の幾何学的直線からの狂いの大きさを意味する。試作機の $X$ および $Y$ 軸の真直度は、テーブル上に固定したダイヤルゲージを運動軸と平行に設置した直定規に沿って滑らせることにより測定した。また、 $Z$ 軸の真直度は、直角度の測定結果から直角度の誤差を除去することで評価した。その結果、 $X$ および $Y$ 軸は、いずれの運動も誤差が $\pm 3\mu\text{m}$ 以内に収まり高い真直性を確認できた。また、 $Z$ 軸に関しても目標値には至らなかったが、 $\pm 10\mu\text{m}$ 程度の誤差に収まり、高い真直性を確認できた。

次に、位置決め精度の測定結果について述べる。位置決め精度は、運動軸の位置決めにおいて、設定した目標値に対する実際に停止した位置の正確さを意味する。試作機の $X$ および $Y$ 軸の位置決め精度は、テーブルの側面に貼付したマグネスケールにより移動量を

測定し、指令値との差として評価した。また、 $Z$ 軸はコラムの下部に設置したレーザ変位計によりスピンドル先端の移動量を測定し、指令値との差を評価した。その結果、 $X$ 軸には最大 $40\mu\text{m}$ 程度、 $Y$ 軸および $Z$ 軸には最大 $150\mu\text{m}$ 以上の大きな位置決め誤差が生じたため、すべての軸運動において補正を行う必要があることを確認した。

さらに、工作精度の測定結果を示す。工作精度は、工作物に対して工作機械が与えることのできる精度を意味する。試作機では、図6に示す形状のワークの加工を実際に行い、得られた加工物の寸法および幾何公差を測定することで工作精度を評価した。なお、被削材はSS400とし、切削条件は工具の推奨条件を参考に決定した。その結果を表2に示す。

表2より、いずれの項目も目標値には至らず、工作精度の不足を確認した。しかし、鋼材切削を $30\mu\text{m}$ 程度の誤差で実現したことは、本機体が既存の小型機に比べ、非常に高い性能を有することを示す。

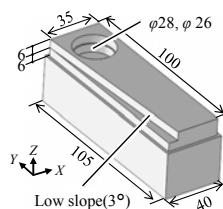


図6 加工物

表2 工作精度

Measurement item	Desired value	Measured value
Straightness	10[μm]	19.5[μm]
Squareness		34.9[μm]
Parallelism		4.2[μm]
Angle accuracy (Low slope)		17.5[μm]

以上で述べたように、試作機の運動性能は一部、目標の精度に達していない。そこで、まず、組付けの改良として、 $X$ 軸に対する $Z$ 軸の直角度に関し、門型コラムのアルミフレーム間に板状のシムを挟むことで傾きを補正した。また、各軸の位置決め精度は、モータに入力するパルス数を生じた誤差分だけ多めまたは少なめに設定することで補正した。その結果、いずれの誤差も $\pm 20\mu\text{m}$ 程度に収まり、精度の向上を確認できた。

補正が行えなかった $\pm 20\mu\text{m}$ 程度の誤差は、小型化にともなう機体の剛性低下による機体変形が原因と考えられる。この誤差に関しては、以下に述べるとおり、機体変形を考慮した工具位置補正により対応する。

(2) (1)では、鋼材を一面切削して加工誤差を測定し、本試作機の加工精度不足を確認した。このような加工誤差が発生した原因として上述のとおり機体の剛性不足が考えられる。

本試作機は機体寸法の小型化にともなう剛性の低下により、切削抵抗に対して機体が容易に変形し、その変形量が加工誤差として現れたと考えられる。そこで、本研究では加工誤差を低減する手法として、図7に示す工具位置補正制御を新たに提案する。同手法は予備試験加工によって、工作物下に設置した動力計によって発生する切削抵抗をまず測定する。次に、あらかじめ求めた機体変形量と負荷力の関係式より、発生した加工誤差を切削抵抗値から予測し、その誤差量を考慮した工具経路を生成する。実際の加工では、生成した経路を使用することで加工誤差の低減が期待できる。

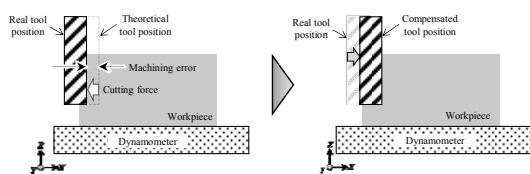


図7 機体変形誤差補正方法

まず、負荷力と機体変形量の関係を調査した。図8に示すようにコラムに対して、滑車を介したワイヤの先端におもりを取り付けることで水平方向荷重を負荷し、その変形量をリニヤゲージで測定した。なお、負荷力は実際に側面切削時に発生する切削抵抗と同程度の25~100 Nとし、XYの全方向に対して負荷試験を実施した。また、XYテーブルに対しても同様に測定を行った。

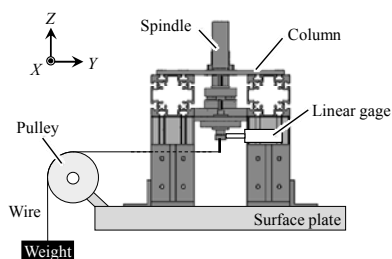


図8 機体変形量の測定試験

X軸正方向への測定結果を例として図9に示す。図中に示す式は、負荷と変形の関係を表す近似式であり、変形量はコラムとXYテーブルの総和を示している。図9より、負荷力と変形量の関係は線形であり、近似式を用いて容易に変形量を推定可能である。また、他のいずれの方向に対しても同様に線形式で負荷に対する変形量を近似することができた。よって、切削時に各方向への負荷を測定して近似式により機体変形量を予測して工具位置を補正することで加工誤差の低減が行える。

しかし、以上の方法では、工具位置の補正にともない予備加工に比べて切削抵抗も増大し、機体変形が予想より増加して、加工誤差を抑制しきれない可能性がある。そこで、新たに発生する加工誤差を正確に予測するため、切削抵抗の主分力と切削幅の関係を調

査した。なお、切削条件はNC加工で使用される条件に基づき、スピンドル回転数4500 rpm、切込深さ6 mm、送り速度615 mm/minとした。測定結果を図10に示す。主分力 $F_t$  [N]と切削幅 $B$  [ $\mu\text{m}$ ]には線形関係があり、切削幅が1  $\mu\text{m}$ 増加することで、主分力は約0.21 N上昇することがわかった。ここで、主分力とは切削面に対して垂直方向に作用する切削抵抗と定義する。この関係を用いれば、切削幅の増加にともない発生する切削抵抗が予測できる。

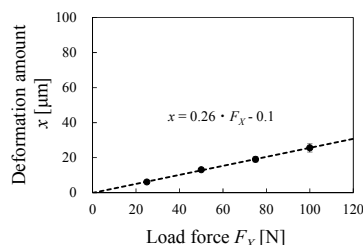


図9 X軸正方向への変形

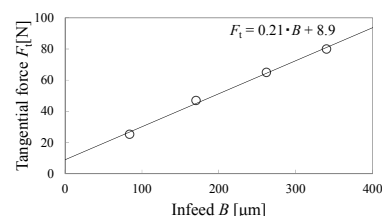


図10 切削抵抗と切削幅の関係

以上の結果に基づく、工具位置補正で発生する加工誤差をも考慮した位置補正の制御手法を以下に述べる。まず、試験加工で得られた主分力 $F_t$  [N]から、機体変形量と負荷力の関係式 $f(F_t)$ より補正量 $c$  [ $\mu\text{m}$ ]を求める。図10より、補正量分多く切り込んだときに増加する切削抵抗は、 $0.21c$  [N]と予測できるので、関係式 $f(F_t + 0.21c)$ より $d_m$  [ $\mu\text{m}$ ]の機体変形が生じると考えられる。そのため、補正により発生する加工誤差 $e$  [ $\mu\text{m}$ ]は、 $d_m$ と $c$ の差として算出できる。ここで、 $e$ の閾値を3  $\mu\text{m}$ に設定し、 $e$ が3  $\mu\text{m}$ 以下であれば、補正量を $c$ に決定する。それ以外では、 $e$ が3  $\mu\text{m}$ 以下になるまで収束計算を行うことで補正量を決定する。

提案する工具位置補正の効果を検証するために一面切削を行い、工具位置補正前後の加工誤差を比較した。一例を図11に示す。工具位置補正を使用して切削した結果、加工誤差は30  $\mu\text{m}$ から10  $\mu\text{m}$ 以下に低減されている。また、赤点線は切削抵抗から予測した補正後の理論値を意味し、実験値とほぼ一致していることから、正確に工具位置補正ができていくことがわかる。さらに、補正量にともない切削抵抗の変化を考慮しない場合の誤差は、10~16  $\mu\text{m}$ 程度となり上述の方法の妥当性も確認された。

様々な方向で同様に切削試験を行ったところ、全側面において加工誤差は数 $\mu\text{m}$ 程度となり高精度加工を実現でき、開発した小型

工作機械および提案する機体変形補正法の有用性を確認することができた。

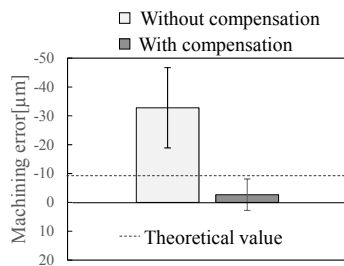


図 11 加工結果

(3) 加工誤差を引き起こす原因として、以上の機体変形に加え、びびり振動が考えられる。本研究では振動の抑制方法として図 12 に示すように物体の振動方向とは無関係に圧電素子を用いたリニアアクチュエータで打撃を加えることで減衰を増加させる方法を検討する。圧電素子を用いた方法としては、圧電素子に振動を吸収させる受動的な方法や、圧電素子で逆位相の振動を負荷する方法が提案されているが、前者は大きな効果は期待できず、また、後者は制御が容易でない。これらに対し、提案する手法は複雑な制御を必要とせず、高い効果が期待できる。

図 13 に実験装置を示す。圧電素子を板バネでケースに固定し、3 軸のスライダに設置したマイクロメータで制振対象物への押付量  $P_s$  を調整する。圧電素子への印加電圧  $V_a$  の振幅を増加することで、振動子の振幅を増幅でき、周波数を共振点に合わせることで、超音波振動を励起できる。なお、制振対象物は  $170 \times 50 \times 5\text{mm}$  の A5052 材の片持ちはりとした。

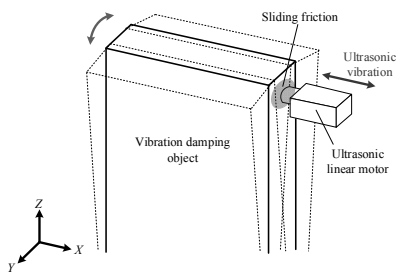


図 12 振動抑制原理の概略

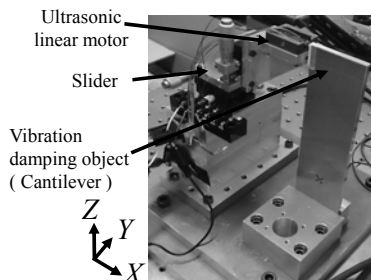
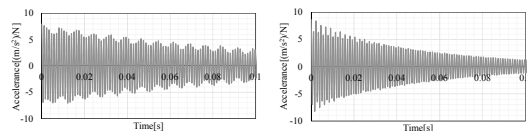


図 13 実験装置

図 13 に示す実験装置を用いて、ハンマリングしたはりの制振効果を検証した。振動子接触部をはり側面に押付量  $0.05\text{mm}$  で加圧接触させ、同状態で交流電圧を  $1$  から  $10\text{V}$  まで  $1\text{V}$  ずつ変化させて超音波振動を励起した。これらの条件下で、固定端から  $30\text{mm}$  の位置に約  $10\text{N}$  の加振力を加え、はり先端から  $15\text{mm}$  の位置に取り付けた加速度センサでアクセラランス(加速度/加振力)を測定し、減衰比を求めた。また、比較のため、振動子をはりに非接触の状態と、接触子をはりに常時接触する押付量  $0.05\text{mm}$ 、印加電圧  $0\text{V}$  の条件下で同様に試験を行った。

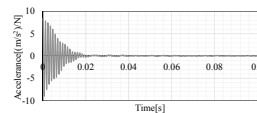
非接触、押付量  $0.05\text{mm}$  で印加電圧  $0\text{V}$  時、押付量  $0.05\text{mm}$  で印加電圧  $6\text{V}$  としたときのアクセラランス時間波形および各波形での減衰比を図 14 および図 15 に、印加電圧  $V_a$  と減衰比の関係を図 16 にそれぞれ示す。

図 15 より、押付量  $0.05\text{mm}$ 、印加電圧  $6\text{V}$  の断続接触時では、減衰比は他と比べて 8 倍以上となっており、提案する手法の妥当性を確認できた。また、図 16 より、本実験の範囲では、印加電圧  $6 \sim 7\text{V}$  付近で減衰比が最大となった。すなわち、振動を抑制するための最適な条件が存在する。現在、リニアアクチュエータによる打撃力の測定を可能とし、その打撃力が圧電素子に発生する電流値に相関することを確認した。今後、これらの結果から最適な圧電素子の駆動条件を見いだして工作機械の振動抑制に応用する。



(a) Non-contact

(b)  $P_s = 0.05\text{mm}$ ,  $V_a = 0\text{V}$



(c)  $P_s = 0.05\text{mm}$ ,  $V_a = 6\text{V}$

図 14 アクセラランスの変化

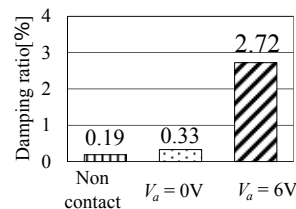


図 15 減衰比の変化

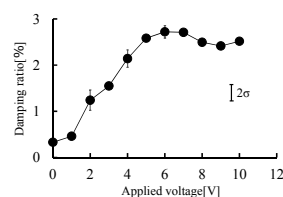


図 16 減衰比の印加電圧に対する変化

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 5 件)

① 柏瀬功二・立矢 宏・中井雄飛, “小形工作機械設計のための機体変形に起因する加工誤差補正方法の検討”, 日本機械学会第 25 回設計工学・システム部門講演会, 2015・9. 24, 信州大学工学部(長野県)

② 木下祥希・立矢 宏・高野昌宏・上野祐亮, “超音波リニアモータを用いた簡易制振手法に関する研究”, 日本機械学会第 25 回設計工学・システム部門講演会, 2015・9. 24, 信州大学工学部(長野県)

③ 中井雄飛・柏瀬功二・立矢 宏, “コンパクトライン実現のための小形工作機械の設計”, 日本機械学会北陸信越支部第 53 期総会・講演会, 2016・3. 5, 信州大学工学部(長野県)

④ 上野祐亮・立矢 宏・高野昌宏, “超音波リニアモータを用いた制振手法の研究”, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 2016・10. 9, 神戸大学(兵庫県)

⑤ 上野祐亮・立矢 宏・樋口理宏・高野昌宏, “制振を目的とした超音波リニアモータの発生力の測定”, 日本機械学会北陸信越支部第 54 期総会・講演会, 2017・3. 9, 金沢大学(石川県)

〔その他〕

ホームページ等

① 機械機能設計研究室ホームページ

最新研究トピックス

コンパクトライン実現のための小型工作機械の開発

<http://da.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/lab/html/research/newtopics.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

立矢 宏 (TACHIYA HIROSHI)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：10216989

(3) 連携研究者

高野昌宏 (TAKANO MASAHIRO)

石川県工業試験場・機械金属部・

専門研究員

研究者番号：50504742