平成29年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「高精度にリアルタイムで加工現象(熱・振動・抵抗) をマルチ計測できる技術・回転式工具の開発」

成果報告書

平成30年3月

担当局 中国経済産業局 補助事業者 公益財団法人岡山県産業振興財団

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
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 耐高速回転・高剛性・熱及び振動からのセンサ保護を実現する機器の設計
 - 2-1-1 小型のセンサを選定、測定・送信回路も含め小型化
 - 2-1-2 遠心力や熱及び切削抵抗に耐えうるセンサ耐性構造と固定及び断熱方法
- 2-2 熱・抵抗・振動の同時測定対応
 - 2-2-1 リアルタイム抵抗計測機器本体の開発と検証
 - 2-2-2 リアルタイム振動計測機器本体の開発と検証
 - 2-2-3 リアルタイムマルチ計測機器の開発と検証
- 2-3 適用対象工具の範囲拡大
 - 2-3-1 スローアウェイ工具への適用拡大
 - 2-3-2 旋盤工具への適用拡大
 - 2-3-3 摩擦攪拌接合 (FSW) 用のツールへの適用
- 2-4 高速サンプリング対応
 - 2-4-1 サンプリング周期を向上させる技術開発
- 2-5 サンプリング周期の安定化
 - 2-5-1 サンプリング間隔を一定化
- 2-6 長時間連続運転(ツールへのエネルギー供給・発電技術開発)
 - 2-6-1 発信器、センサ駆動、信号のAD変換器等の低消費電力化
- 2-7 リアルタイムマルチ計測機器の性能評価試験
 - 2-7-1 切削 ver. の性能評価
 - 2-7-2 FSW ver. の性能評価

第3章 全体統括

- 3-1 開発研究成果
- 3-2 事業化展開

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

東日本大震災及び、福島県の原子力発電所事故の影響により、日本のエネルギー政策は大きく見直される結果となった。現状では、原子力発電の稼働において、様々な安全上の問題をクリアできる状況ではなく、㈱山本金属製作所本社がある大阪でも平成27年6月から関西電力による電気料金の値上げが実施されるなど、福島県の原子力発電所の事故以降、"電気料金の値上げ"という問題が製造原価を押し上げる要因として無視できなくなってきている。

そこで、日本政府もエネルギー政策のあり方として、エネルギーの安定供給、エネルギーコスト低減の観点も含め、責任あるエネルギー政策を構築しようと、産業界にも努力を求めている。実際、山本金属ユーザーでもある(株) 東芝、三菱日立パワーシステムズ(株)、三菱重工業(株)、川崎重工業(株)、(株) IHI などのエネルギープラントメーカーでは、エネルギー効率のさらなる改善という技術課題に取り組んでいる。具体的には、エネルギープラントの重要構造部品である回転機器(タービン)の高精度・高効率化を実現するために、より耐熱性のある難削材への取組み、または、エネルギー効率に大きく影響する "翼"の複雑形状化へのニーズが急速に高まっている(図1参照。)

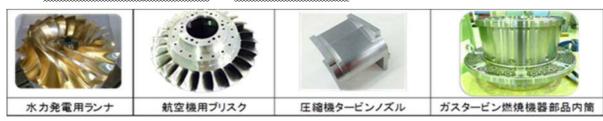


図1 山本金属で加工した回転機器 "難削材" "翼"の複雑形状事例

発電用タービン翼では燃焼温度の高温化に伴い、従来よりも耐熱効果の高い"耐熱合金"を使用したいとのニーズがある。そのような材料は高温環境下でも翼の溶解を防ぐという目的があり、耐熱合金の融点をより上げるために、ニッケルなどベースとなる金属にさらにコバルトやクロム、モリブデン、タングステン、タンタル、レニウムといったレアメタルを配合して製造されている。これらの耐熱効果の高い"耐熱合金(難削材)"は非常に削りにくく、新素材であるために従来の経験やノウハウが通用せず、加工難易度が極めて高い。

また、エネルギー効率に大きく影響する静翼・動翼などの三次元複雑形状翼に対するニーズは三次元CADの高度化や、シミュレーション技術の高度化から、より羽根1枚1枚の高さが高く、薄肉で、ひねりも大きい形状が求められ、如何に設計形状どおりに製作するかが重要になる。さらに、複雑な三次元形状翼に対して切削加工を行う場合、翼の形状が頻繁に変わるため、最適な加工条件が定まらず、生産現場では都度、問題を抱え、製作に多大な時間を要しているのが現状である。こうした難削材を使用した翼を加工する上で、難削材加工と翼の加工が得意な㈱山本金属製作所だけでなく、川下企業の生産現場でも日々、様々な課題が発生している(表1参照)。

表 1 難削材を使用した三次元複雑形状翼加工における生産現場の具体的な課題

- ・工具寿命が極めて短く、工具欠損が突然発生する。
- ・工具刃先に被削材の溶着が発生する。
- ・切削熱が上昇しやすく、切削抵抗が大きい。
- 切屑処理性が悪い。
- ・加工が不安定で自動加工、連続無人加工ができない。
- ・切削ポケットが狭小のため、切屑が詰まりやすく、刃先に熱がこもる。
- ・翼間隔が狭く、工具と被削材の干渉により、突き出し部(全長)の長い工具に依存するため、加工表面がびびり、製品品質が低下する。

以上の課題の大部分は精密学会の事例や実際の加工現場事例から、**工具先端にかかる温度や抵抗、振動による影響が多い**ことが推定されている。

●動向

難削材の三次元複雑形状翼を加工するには、五軸マシニングセンターや五軸複合加工機といった工作機械を使うケースが多い。このような加工機には工具そのものが回転する回転工具を使用する。つまり、回転工具を使用し、前述した難削材の三次元複雑形状翼の加工に関する具体的な技術課題に取組む必要がある。

現状では、生産技術開発部門や製造現場において、これらの技術課題を解決すべく、これまでの経験と実績の延 長線上に基づき、様々な加工条件で加工した後の工具の状態、被削物の状態等から推測し、試行錯誤しながら最適 条件の導出に取組んでいる。しかし、回転工具の刃先や回転工具そのものに負荷される切削熱や切削抵抗、工具に かかる振動を、加工しながら定量的に計測できる機器が存在しないため、加工現象を正確に把握できないというこ とが、大きな課題として挙げられている。そこで、これらの課題を解決できる新たな加工技術の開発が求められている。

従来から、一般的に用いられている回転工具先端に発生する「切削熱、切削抵抗、工具の振動を見る」ための手法としては「抵抗・振動検出法」「表面温度法」「主軸モータ信号法」といった3つの方法が知られている。(株山本金属製作所においても、強みである2つのコア技術(精密加工技術と計測評価技術)を用いて、難削材加工や、複雑三次元形状翼の加工におけるより最適な加工条件を導出する手法を開発してきた。その手法とは ①赤外線サーモグラフィーを用いた工具先端付近の温度の計測 ②切削動力計を用いた加工中の切削抵抗の計測 ③ハイスピードカメラを用いた切り屑形状の観察等といった手法であり、これらの技術を用いて難削材加工や複雑三次元形状翼の高効率加工に取り組んできた。

しかし、上記のような方法では、いずれも、回転中の工具が発する「微弱な信号」を、正確かつ絶対値として、 リアルタイムに長時間、連続的に計測し続ける必要があり、実務的にも難しいということがわかった。

そこで、㈱山本金属製作所では、回転工具の先端部の状態を、長時間センシングする道具として、工具(エンドミル、ドリル、タップ等)の内部に熱電対を挿入し、熱のモニターリングが簡易的に測定できるリアルタイム熱計 測機器を試作し、以下の基礎的な技術的知見を取得した。

通常、回転工具内部に熱電対のみを挿入し、回転工具の外に設置した計測機器と**有線接続する場合、配線が工具の回転に伴い治工具に絡みつき、破断**するという問題がある。しかし、㈱山本金属製作所では創業以来 50 年間培ってきた精密加工技術と計測評価技術という2つのコア技術を活用することで、回転工具内部に挿入した熱電対(1ch)とその測定機器部(熱起電力を増幅し、デジタルの温度情報に変換する電子回路)と無線送信機を工具ホルダー内部に配置した。この機器が計測するデータを工具ホルダーの外周部に設置したアンテナより送信、熱計測機器を試作した(図2参照)。その結果、加工中に測定した工具先端の温度結果を、無線でリアルタイムに外部モニターできることを確認した。





図2 予備検討で開発したリアルタイム熱計測機器

続いて、**データ送受信機を多チャンネル化**し、加工状態をリアルタイムでモニタリングできる回転式工具の刃先において、**計測箇所の高さを変えた3か所の同時温度計測(多点同時計測)に対応**したリアルタイム熱計測機器も試作し、試験を行った。なお、(株山本金属製作所のコア技術である計測評価技術を用いて、試作したリアルタイム熱計測機器で行った加工試験と同条件で赤外線サーモグラフィーで表面温度を測定した結果、工具内での高さに依存する表面温度分布結果が得られ、「リアルタイム熱計測機器」としては十分な基本性能を有することが実証され、長時間、高能率加工が可能な最適加工条件を導く道具として活用できることを示せた。

以上の事前検証及び川下ユーザーへのヒアリングをもとにニーズ調査を実施した結果、エネルギーの高効率化に貢献するためには、現状の無線式工具温度計測機器に対して、新たな課題を把握した。以下に課題を上げる。

【事前検証及び川下ユーザーへのヒアリング調査の結果による新たな課題】

- (ア) 温度のみしか測定できない
 - (切削熱だけでなく、切削抵抗、工具にかかる振動を同時に把握したい)
- (イ) 特定の工具にのみ対応(現段階ではソリッドタイプのみで、スローアウェイタイプにも対応していない)
- (ウ) サンプリング周期が遅い(現状最大で40Hz)
- (エ) 高速回転ほどサンプリング周期が低下 (20、000rpm で約90%低下)
- (才) 長時間連続運転(現状30時間)

本事業では上記の課題を解決し、エネルギーの高効率化に貢献する。

また、回転工具を使って摩擦熱によって材料同士を接合させる摩擦撹拌接合(FSW)の先端部分においても、ツール先端の熱、加圧力をリアルタイムで見える化できていないという問題をかかえている。すでに、(株山本金属製作所のリアルタイム熱計測機器を購入したエネルギープラントメーカーである株IHI、さらに(株) 日立パワーソリューションズや(一社) 軽金属溶接協会からも展示会や学会発表を通じて、切削用だけでなく、FS W用としても展開できないかとの問い合わせをもらっている。

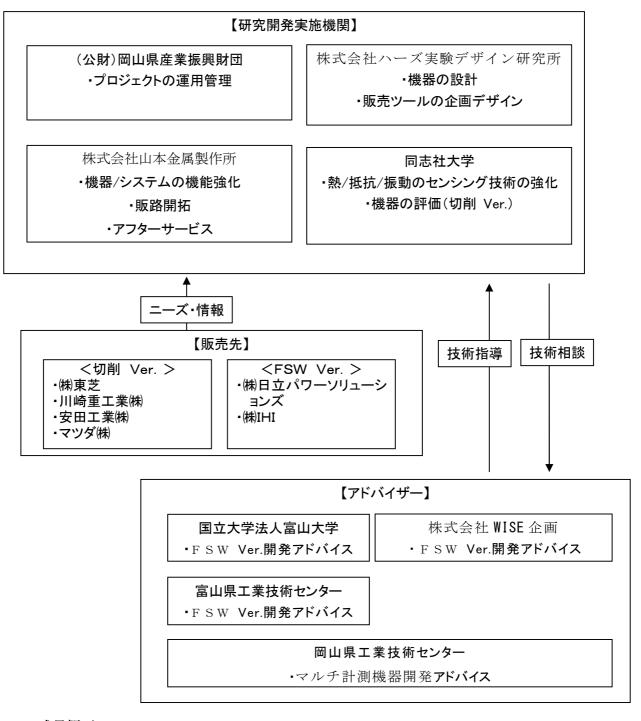
本事業で開発するリアルタイムマルチ熱計測機器はFSWの分野に対しても水平展開し、最適な接合条件の導出及び、接合の品質向上といった諸問題の解決に貢献できると考える。従って、研究開発の具体的な取組みについては切削用とFSW用を同時に進行するものとする。ただし、FSWにおいては、異材同士を接合させる場合がある為、異材表面通過中の温度差を測定する目的として、i)温度計測の技術及び、ii)異材間をセンサが回転移動する間に生ずる温度変動への追従性・応答性の向上技術の開発が必要になる。

目標:本事業では加工性能の向上のために、難削材や複雑形状翼加工をする際にテスト加工の際の加工条件をデータベース化し、最適加工条件を導き、生産能率の高度化に寄与するための技術開発のために、計測装置の開発を行う。

| 0 | | | | | | | |
|---|--|---|--|--|--|--|--|
| 開発テ | | 目標值 | | | | | |
| 1. 耐高速回転・高剛性・熱及び振動からのセンサ保護を実現する機器の設計の開発 | | | | | | | |
| 1.1 | 小型のセンサを選 定、測定・送信回路 も含め小型化 | ①抵抗センサ: サイズ:13×30×0.05(mm)以下 / 重量:2g以下 ②振動センサ: サイズ:5×5×2(mm)以下 / 重量:1g以下 | | | | | |
| 1.2 | 遠心力や熱及び切 削抵抗に耐えうる センサ耐性構造と 固定及び断熱方法 | ①工具内にリアルタイムマルチ計測機器を配置し、データ送信できること②工具先端温度 600℃環境下での温度ドリフト誤差±0.5℃以下③主軸回転数 20、000rpm で釣合い上限 2.5G | | | | | |
| 2. 熱 | ・抵抗・振動の同時測定 | [対応(マルチ情報センシングの開発) | | | | | |
| 2. 1 | リアルタイム抵抗 計測機器本体の開 発と検証 | リアルタイムに無線式で抵抗を計測できる装置の開発 | | | | | |
| 2.2 | リアルタイム振動 計測機器本体の開 発と検証 | リアルタイムに無線式で振動を計測できる装置の開発 | | | | | |
| 2.3 | リアルタイムマル チ計測機器本体の 開発と検証 | リアルタイムに熱・抵抗・振動を同時に計測できる装置 の開発 | | | | | |
| | 用対象工具の範囲拡大 | -teter . M. o. I | | | | | |
| 3. 1 | スローアウェイエ 具への適用拡大 | 事例 2 件以上 | | | | | |
| 3. 2 | 旋盤工具への適用 拡大 | 事例 2 件以上 | | | | | |
| 3.3 | 摩擦攪拌接合(FSW) 用のツールへの適 用 | 事例 2 件以上 | | | | | |
| 4. 高記 | 速サンプリング対応 | | | | | | |
| 4 | サンプリング周期を 向上させる技術開発 | 20,000rpm での現行サンプリング周期 40Hz → 200Hz | | | | | |
| | ンプリング周期の安定化 | | | | | | |
| 5 | サンプリング間隔を 一定化 | 設定サンプリング間隔で計測時、タイムラグ±10%以内 | | | | | |
| 6. 長時 | 時間連続運転 | | | | | | |
| 6 | 発信機、センサ駆動、 信号の AD 変換機等 の低消費電力化 | 最低 100 時間以上連続稼動 | | | | | |
| 7. リン | アルタイムマルチ計測機 | 後器の性能評価試験 | | | | | |
| 7. 1 | 切削 ver.の性能評 価 | データベース 50 件以上 | | | | | |
| 7.2 | FWS ver.の性能評価 | データベース 30 件以上 | | | | | |

1-2 研究体制

研究体制全体図を下図に示す。



1-3 成果概要

サブテーマ【1】において、選定した小型センサを使用し温度と振動のマルチ計測機器による送受信が実現できたことを確認し目標を達成。サブテーマ【2】においてマルチ計測精度±5%F.S.未満であることを確認し目標を達成。サブテーマ【3】においてスローアウェイ工具、旋盤工具、摩擦攪拌接合(FSW)用ツールへ範囲を拡大し目標を達成。サブテーマ【4】において、高速回転時でのデータ欠落がなくなりサンプリング速度 254Hz を確認し目標を達成。サブテーマ【5】において、受信タイムラグ 1%を確認し目標を達成。サブテーマ【6】において、126 時間データを受信し続けていることを確認し目標を達成。サブテーマ【7】においては切削 ver. 累計 50 件、FSW ver. 累計 30 件のデータを取得し、目標を達成した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

管理法人:公益財団法人岡山県産業振興財団

所在地 : 〒701-1221 岡山県岡山市北区芳賀 5301 テクノサポート岡山 3F

担当者 :ものづくり支援部 次長 入江 栄治

連絡先 : 086-286-9651

E-mail : bay @optic.or.jp

研究機関:株式会社山本金属製作所 岡山研究開発センター

所在地 : 〒701-1221 岡山市北区芳賀 5324

担当者 : 河合 真二 連絡先 : 086-239-8585

E-mail : kawai@yama-kin.co.jp

第2章 本論

【2-1】耐高速回転・高剛性・熱及び振動からのセンサ保護を実現する機器の設計開発

【2-1-1】小型のセンサを選定、測定・送信回路も含め小型化

目標値 マルチ計測機器による送受信

結果 温度と振動のマルチ計測機器による送受信を実現した。

【2-1-2】遠心力や熱及び切削抵抗に耐えうるセンサ耐熱構造と固定及び断熱方法

目標値 工具先端温度 600℃下での誤差±0.5℃以下

結果 工具先端温度 600℃下での誤差を 0.5℃とした。

1. 目的

加工機に取り付けるツールの大きさには制限がある。その上で切削に耐えうる剛性を保つ必要があるので、計測のための回路は可能な限り小型にする必要があり、熱計測で実績のある大きさを上限としてマルチ計測ツールを開発する。また、切削中の温度は600℃程度まで上昇する。工具先端が600℃となっても計測し続ける必要があるため耐熱性も重要である。

2. マルチ計測機器の構造

平成 28 年度は圧電式の加速度センサによる振動検知を工具座標系の Xm, Ym の軸方向と回転方向 Rm の 3 方向検知を実現した。本年度はマルチ計測として振動と温度の同時計測を実現するため、振動 3 成分検知を実現した回路 (a) を基に振動 2 成分と温度 1ch を計測可能な回路 (b) とした。それぞれのブロック線図を Fig. 1-1 に示す。振動と熱の同時計測を可能とした計測ツールは BT30 シャンクの小型のホルダへ実装した。その外観を Fig. 1-2 に示し、内部構造を Fig. 1-3 に示す。ホルダ中心部に電池、基板、センサを配置し、ホルダ外周部にアンテナとスイッチを配置している。

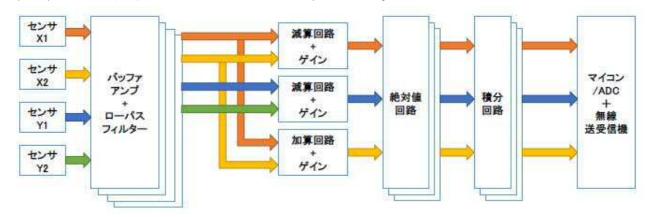


Fig. 1-1a) 振動 3ch のブロック線図

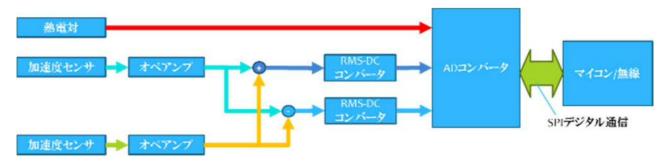


Fig. 1-1b) 振動 2ch+熱 1ch のマルチ計測用ブロック線図 Fig. 1-1 マルチ計測ブロック線図



Fig. 1-2 マルチ計測ツール概観

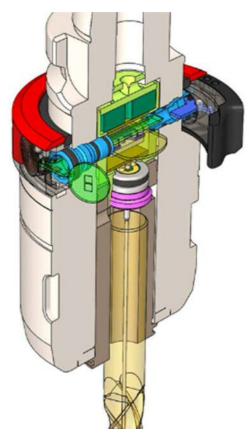


Fig. 1-3 マルチ計測ツール内部構造

3. 送受信検証

計測ツールを用いて、実際の加工を行う。その際の振動と温度データを取得し送受信確認を行った。測定データを Fig. 1-4 に示す。



Fig. 1-4 マルチ (振動+温度) 計測画面

4. カートリッジヒータでの検証

昨年度切削加工中の温度は 600°C以上となるといわれている。少なくとも 600°C環境下で計測が実施できていなければならない。そのための検証方法として、カートリッジヒータによりヒータ表面温度を 600°C となるように制御し、熱電対先端をヒータに接触させ検証した。熱電対の1つは計測ツールで測定し、1つはデータロガーで直接測定した。計測時の写真を Fig. 1-5 に示す。50°Cからカートリッジヒータを加熱し、そのときのデータロガーと計測ツールの測定結果を Fig. 1-6 に示す。データロガーが 593.2°C、計測ツールは 593.7°Cであるので、誤差 0.5°Cとなっていることを確認した。

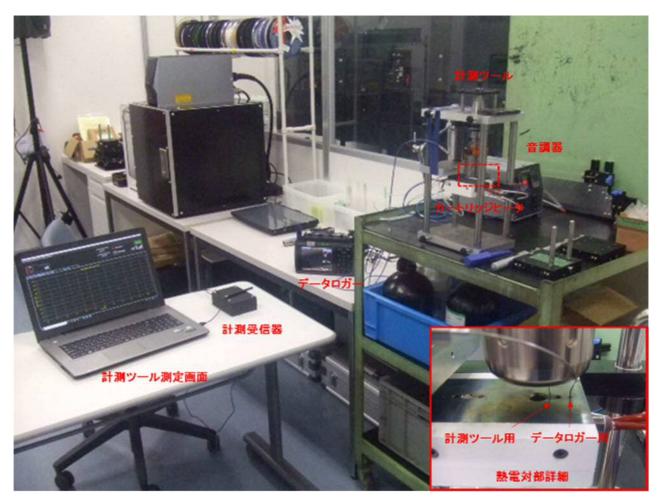


Fig. 1-5 計測風景

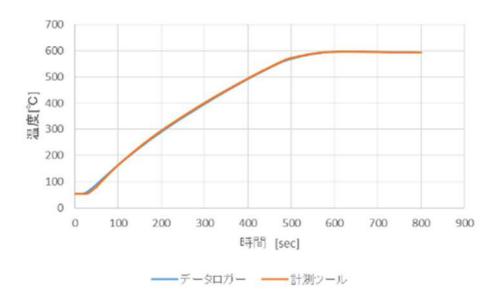


Fig. 1-6 工具表面温度 600℃における計測温度と内部温度

【2-2】熱・抵抗・振動の同時測定対応

【2-2-3】リアルタイムマルチ計測機器本体の開発と検証

目標値 マルチ計測精度±5%以下

マルチ計測ツールを加振器に取り付け、振動計測検証を実施し $800\text{Hz}\sim1,800\text{Hz}$ の間で $\pm5\%\text{F}$. S. の精度で検知していることを確認した。更に650Hz、1,970Hz の共振周波数付近を除けば $150\sim2,800\text{Hz}$ 間でも $\pm5\%\text{F}$. S. の精度であることを検証し、温度計測は0.5%であることから $\pm1\%\text{F}$. S. 未満であることを検証した。

1. 目的

抵抗計測機器や振動計測機器の計測精度は測定機器として用いる場合に重要な要素である。本項では開発した計測機器 (Multi Intelligence) と同時に他の計測機器で計測し、データの計測精度を検証する。

2. 振動計測精度の検証

結果

振動・熱のマルチ計測ツールを加振器に設置し、所定の振動を与えてマルチ計測ツールの計測精度を検証した。仕様を $200m/\sec^2$ を上限としているので、 $\pm 5\%$ F. S. は $\pm 10m/\sec^2$ に相当する。入力加速度は 10、50、100、150、 $200m/\sec^2$ であり、50Hz~3, 000Hz の範囲で行った。結果を Fig. 2-1 に示す。入力加速度 $100m/\sec^2$ 、 $50m/\sec^2$ 、 $10m/\sec^2$ は 100~3, 000Hz の間で $\pm 5\%$ F. S. 内の精度を満たしている。 $150m/\sec^2$ 、 $200m/\sec^2$ の際には 650Hz 付近、1970Hz 付近に共振点とみられる付近で $\pm 5\%$ F. S. を超えているが、それ 以外の周波数においては $\pm 5\%$ F. S. 内の精度を満たしていることが確認できた。

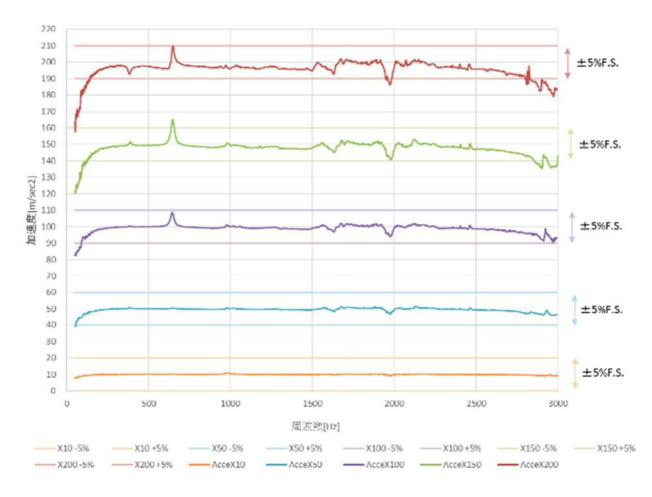


Fig. 2-1 周波数での加速度結果

3. 温度計測精度の検証

前章にて検証したとおり、600 $^{\circ}$ Cにおいて 0.5 $^{\circ}$ Cの誤差であった。計測ツールの温度仕様は 1000 $^{\circ}$ Cまで計測可能であるので、 ± 5 %F.S. は十分に満たしている。

4. 二成分表示(温度・振動)のユーザーインターフェース

本体機器のUIデザイン(二成分合成タイプ・Data Viewer)の検討及び作成を実施した。前年度で検討したタイプを基盤に各タイプの仕様検討・修正・作成等を行った。主にマルチタイプに関して、これまで二年で積み上げたリサーチや様々な検討を元により使い易いUIにするため、新たな機能及び配置の試作検討を行った。

二成分合成タイプの検討

前年度に検討を行った「二成分合成タイプ」の試作モデルに関して各モデルの問題検討を行った。

- □平面タイプ A (Fig. 2-2) の問題点
- ・既存のシングルタイプ UI に近く、革新性に欠ける
- ・現在表示されているグラフが判別しにくい
- □平面タイプ B (**Fig. 2-3**) の問題点
- ・前モデルとの違いが大きく、分かりにくい
- ・グラフの横幅が狭く、俯瞰して見ることが難しい
- ・グラフの入換え機構が分かりにくい
- ・現在表示されているグラフが判別しにくい
- □立体タイプ (Fig. 2-4) の問題点
- ・グラフが水平でなく、正確に数値が確認できない
- ・グラフの進行方向が反対で読み取りにくい
- ・グラフの入換え機構が分かりにくい
- ・現在表示されているグラフが判別しにくい



Fig. 2-2 平面タイプ A



Fig. 2-3 平面タイプB



Fig. 2-4 立体タイプ

新規機構モデルの配置検討

「前年検討モデルの問題整理」の結果多く見られた「グラフの入換え機構が分かりにくい」「現在表示されているグラフが判別しにくい」の二点の問題を軸に新規 UI の配置検討を行った。

上記二点の問題解決及びより良い使用感を生むため、操作が容易でシンプルな「プッシュボタンタイプ」と、使用感に馴染みがあり直感的な操作が可能な「インデックスタブタイプ」の二種類の UI を計 5 個作成し検討を行った。

\square プッシュボタンタイプ A (Fig. 2-5)

グラフ右側に各計測要素に合わせたプッシュボタンを設置し、確認したい要素のボタンを押すことでグラフが拡大表示され確認することが出来る UI。表示中の要素は「計測要素ピクトグラム」にフレームを付けることで確認が可能。

問題点:グラフ表示自体のサイズが小さく俯瞰して確認しにくい。

□プッシュボタンタイプ B (**Fig. 2-6**)

グラフ上部の「SWITCHING」のプッシュボタンを押すことで計測要素のメニューバーが表示され、確認したい要素を選択することでグラフが表示される。表示中の要素は「計測要素ピクトグラム」にフレームを付けることで確認できる。

問題点:グラフの切り替えに2回のクリックが必要でスムーズな切り替えが出来ない。

□プッシュボタンタイプ C (Fig. 2-7)

UI 右側に「計測グラフ 1・計測グラフ 2・計測数値を重ね合わせたグラフ」の三つのグラフを常時表示させる UI 。グラフの左右にグラフ切り替え用のプッシュスイッチを設置し、三つのグラフを回転させ切り替えを行う。

問題点:グラフ表示自体のサイズが小さく俯瞰して確認しにくい。



Fig. 2-5 プッシュボタンタイプ A

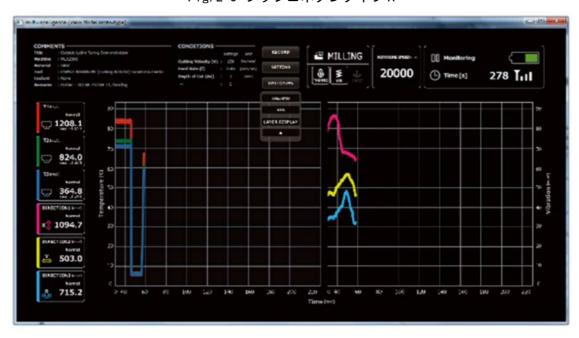


Fig. 2-6 プッシュボタンタイプ B



Fig. 2-7 プッシュボタンタイプ C

\square インデックスタブタイプ A (Fig. 2-8)

UI 中央部に「インデックスタブ」を採用し、表示要素の切り替えを簡単に行うことが出来る。同時に、WEB 等で馴染のあるタブ方式を採用することで表示グラフの確認もより感覚的に行える。グラフは縦に二枚並べて表示。

問題点:グラフ表示自体のサイズが小さく俯瞰して確認しにくい。

UI 中央部に「インデックスタブ」を採用し、表示要素の切り替えを簡単に行える。同時に、WEB 等で馴染のあるタブ方式を採用することで表示グラフの確認もより感覚的。グラフは横に二枚並べて表示。

問題点: 二枚のグラフを横に並べているため、時間軸が合わない。

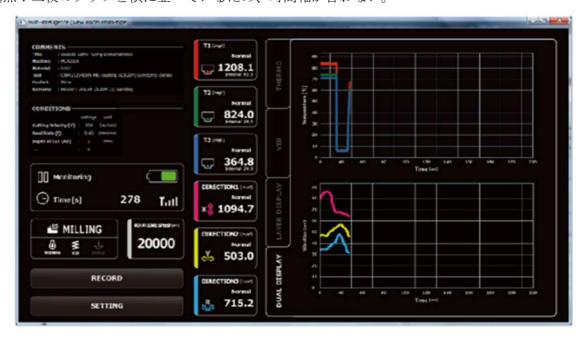


Fig. 2-8 インデックスタイプ A



Fig. 2-9 インデックスタイプB

追加機能検討

新たな拡張機能として「ACTION 機能」の追加検討を行った。「ACTION 機能」は「Multi Intelligence」の新機能として追加された NC 加工機との連動機能を有効に活用するため、しきい値を設定することで様々な動作を始動させることが出来る。Fig. 2-10 に ACTION 機能の一例を示す。測定値がしきい値を超えた際にアラームとして、画面上のアラーム表記を反転しユーザーへの視認性をあげている。



SETTING

SETTING

SETTING

THERMO
STOP: 88°C

NEW ACTION

NEW ACTION

ALARM: 75 mar

RECORD

Fig. 2-10(a) 通常画面

Fig. 2-10(b) アラーム画面

Fig. 2-10 ACTION 機能画面

製品化へのブラッシュアップ

これまで検討してきた中で総合的に評価の高かった「インデックスタブタイプ」の二種類に関して、双方のブラッシュアップを行った。Fig. 2-11 に示す全体のレイアウト検討を行った後、Fig. 2-12 の試作モデルを基準に詳細なディテール調整を行った。



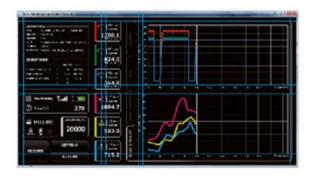


Fig. 2-11 表示レイアウト





Fig. 2-12 ディテール調整

Data Viewer の検討

追加機能検討

Fig. 2-13 に示すように新規に作成した「Data Viewer」は詳細機能やボタンよりグラフの範囲を大きくとり、グラフの視認性を向上させた。今までのタイプより大きくグラフを表示させるため、上部の情報表示部にインデックスタブ機能を採用し、必要な機能を選択して見られるよう考慮した。

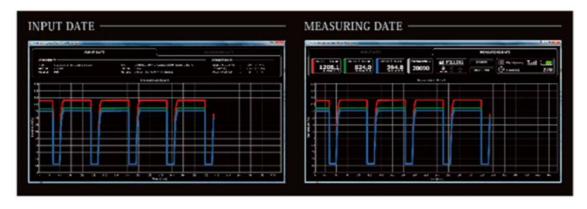


Fig. 2-13 Data Viewer 画面

製品化へのブラッシュアップ

ラフプランとして作成していた検討用 Data Viewer を基準に、全体のレイアウト (Fig. 2-14) 及びディテール修正 (Fig. 2-15) を行った。

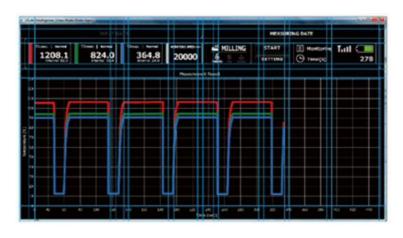


Fig. 2-14 全体レイアウト

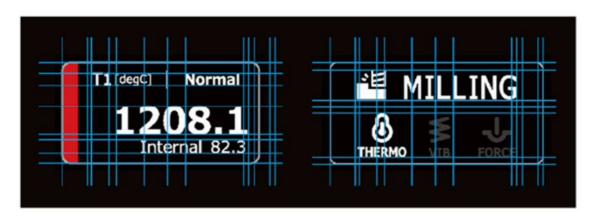


Fig. 2-15 ディテール調整

今後の開発課題

■二成分合成タイプ UI

これまでの試作検討の結果タイプの方向性として「インデックスタブタイプ」が直感的で操作が分かりやすいことが実証され、上記タイプの二種類の最終形状の作成を行った。ただ、双方の UI に長所短所があり、片方に絞りきれていない状態である。今後はこの二つの UI をどのようにして製品に生かしていくかが課題となる。状況に応じて選択するタイプや使用者に併せてバリエーションを用意し、別個の UI として販売を行うタイプなど様々な方向性が考えられる。ここからは販売価格やデータ容量、技術的側面など、より現実的な項目も含め検討する必要がある。

■Data Viewer

これまでの試作検討によって限界まで削ぎ落とされた最低限の表示を行う UI が完成している。ここからは、再度試作検討及び実施試験を行い現場で使用する際に必要な機能を確認し、削ぎ落としてしまった機能も含め採用検討を行う必要がある。現在の時点では実施試験は行っていないため実動試作が完成次第実施試験を行い Data Viewer における最低限の形を絞り込んでいく必要がある。

【2-3】適用対象工具の範囲拡大

【2-3-1】スローアウェイ工具への適用拡大

目標値 熱計測ツール1件以上

結果 刃先交換式エンドミルシャンク: MSN-M8-120-S16C に適用可能なことを検証した。

【2-3-2】旋盤工具への適用拡大

目標値 熱計測ツールへの適用拡大1件以上

結果 外径溝加工に新たに適用した。

【2-3-3】摩擦攪拌接合 (FSW) 用のツールへの適用

目標値 熱計測ツール1件以上

結果 板厚1mm用のツールへ適用した。

1. 目的

加工を行う際には多種多様な工具を使って行う。従来からツールメーカーは工程に合わせ最適なツールを開発してきた。リアルタイムで加工現象を計測するツールは計測機器でありながら、加工工具でもあるため、多種多様なツールに適用する必要がある。

2. スローアウェイ工具への適用

スローアウェイ工具への適用のため、刃先交換式のエンドミルに適用した。Fig. 3-1 に適用した工具の取り付け写真を示す。インナースルー用の穴を利用し、温度計測用の熱電対を挿入して計測することが可能である。



Fig. 3-1 a) スローアウェイチップ無し



Fig. 3-1 b) スローウェイチップ取付

Fig. 3-1 スローアウェイ工具

3. 旋盤工具への適用

旋盤工具への適用のため、外径溝加工への適用を進めた。Fig. 3-2(a)に示す溝加工形状を加工した際の温度データをFig. 3-2(b)に示す。

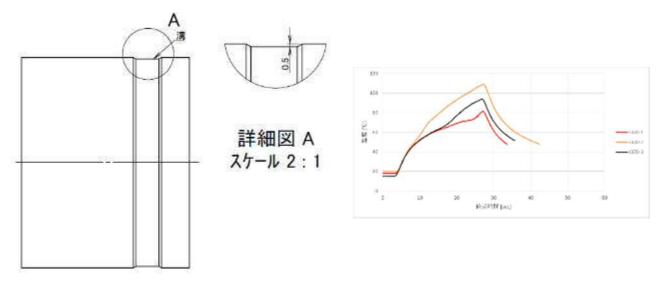


Fig. 3-2 a) 溝形状

Fig. 3-2 b) 計測データ

Fig. 3-2 旋削工具

4. 摩擦攪拌接合 (FSW) 用のツールへの適用

FSW 用ツールへの適用のため、Fig. 3-3 に示す先端ツールを製作した。先端ツールには熱電対用の温度センサが固定されており、温度センサはコネクタ接続で熱計測ツールと接合する。Fig. 3-4 に本ツールを加工装置に取り付けて加工した状態を示す。



Fig. 3-3 1mm 用 FSW 用ツール



Fig. 3-4 1mm ツールでの接合材

【2-4】高速サンプリング対応

【2-4-1】サンプリング周期を向上

目標値 20,000rpm 回転で200Hz 以上

結果 高速回転時でのデータ欠落がなくなりサンプリング速度 254Hz を達成した。

1. 目的

本計測ツールは回転工具の熱・振動・抵抗の値をリアルタイムに計測するため、無線でデータを送信 している。送信にはデジタルデータとして行っているため、高サンプリングレートが望ましい。

2. 無線通信方式

平成28年度までの通信方式は位相偏移変調(PSK: Phase Shift Keying)を採用していたが、高速回転領域において、受信成功率の低下が見られた。そこで通信方式を周波数偏移変調(FSK: Frequency Shift Keying)にすることで、高速回転領域での受信成功率の低下を防ぐこととした。ファナック製ロボドリルの主軸に計測ツールを取り付け、主軸回転数毎の受信成功率をPSKとFSKで比較した結果をFig. 4-1に示す。なお、受信機は機内側面、機外扉端、主軸端面のそれぞれに設置して比較した。FSKにすることで、主軸端面では受信率の低下は全くないことが実験より分かった。



Fig. 4-1 主軸回転数毎の受信成功率

3. サンプリングレートの検証

主軸回転速度 20,000rpm 送信設定 3msec にて検証を行った。送信機側のタイムスタンプより 1 秒間 に 254 データを取得していたことから 254Hz を達成。設定値どおりであれば 333Hz となるはずであるが、スキャン時間に約 1msec 必要なことから実質 4msec 間隔でデータを受信していることが Fig. 4-2 から分かる。

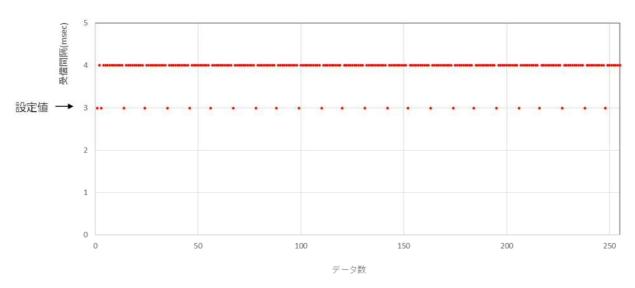


Fig. 4-2 受信間隔とデータ数

【2-5】サンプリング周期の安定化

【2-5-1】サンプリング間隔を一定化

目標値 タイムラグ 10%以内

結果 データの欠落がなくなり受信タイムラグは 1%へ低減した。

1. 目的

本計測ツールは回転工具の熱・振動・抵抗の値をリアルタイムに計測するため、無線でデータを送信している。送信はデジタルデータとして行っているため、高サンプリングレートが望ましい。昨年度までの【4】の結果よりサンプリング間隔が一定となっていない結果となっており、失敗率の影響と推察された。失敗率を低下させることで、サンプリング間隔の一定化が達成されると思われ、失敗率低下を目指す。

2. タイムラグの検証

前章にて 20,000rpm にて主軸端面に受信機を設置した場合は成功率 100%であった。また受信間隔の 誤差も 1msec 以内であったので、100msec の送信間隔設定で 10,000 データの送受信を行った。その結果 を Fig. 5-1 に示す。結果は 100msec 間隔で受信したものが 4,140 データ、101msec で受信したものが 5,859 データとなっており、設定値に対し、タイムラグは 1%のとなっている。



Fig. 5-1 タイムラグの検証

3. 受信成功率の改善

前章にて、受信機を主軸端面に設置した場合は成功率の低下はなかったが、機外に受信機を設置した際には高速回転領域にて若干の受信率低下が見られた。そのため、アンテナの改良を試みた。

まず、改良前のアンテナの性能を評価するため、Fig. 5-2 に示す方式にてネットワークアナライザによる反射率測定を行った。本測定ではアンテナから電波が発生すると反射して戻ってくる信号の量が低下する。Fig. 5-3 に改良前の測定結果を示す。赤色線はアンテナを接続しないでケーブルのみの時の反射を示しており、黄色線がアンテナ接続時の反射を示している。その差は 1dB 程度しかなくほとんど電波として放出していないことが判明した。電波として放出していれば、青色線のように反射してくる量は 2. 4GHz付近で低下するはずである。基板の大きさや GND パターンの配置を変更した改良版を同様に評価した結果を Fig. 5-4 に示す。反射率が 0.32 まで改善していることが検証できた。

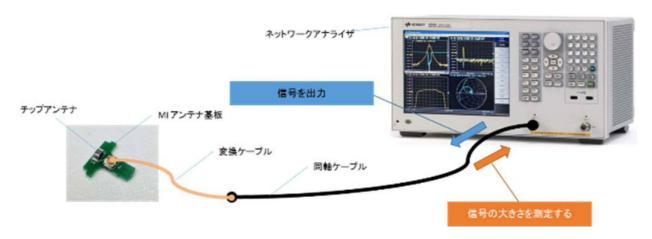


Fig. 5-2 反射率測定システム

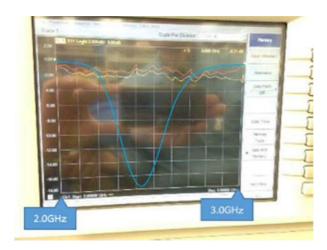


Fig. 5-3 改良前の反射率



Fig. 5-4 改良後の反射率

【2-6】長時間連続運転

【2-6-1】発信機、センサ駆動、信号の AD 変換機等の低消費電力化

目標值 100 時間以上連続稼動

結果 満充電からデータ受信できなくなるまでログをとり 126 時間データを受信し 続けていることを検証した。

1. 目的

計測ツールは長時間の加工中でも計測を継続し続ける必要がある。供給する側の対策として、a)電池 容量のアップ、b) 給電、c) 発電が考えられる。消費する側の対策として消費電力を削減することが考えられる。

2. 消費電力の検証

平成 28 年度消費電力削減を行い 19.8mW とし、理論的には 100 時間以上の連続運転が可能となった。 本体(センサー側)の出力ログより Time: 636539219 (msec) であったことより 176 時間 48 分稼動し続けた ことが検証できた。そのうち電源電圧 3V 以上 (LSI 仕様範囲内) の時間は 126 時間である。

【2-7】リアルタイムマルチ計測機器の性能評価試験

【2-7-1】切削 ver. の性能評価

目標値 データベース 50 件以上(累積) 結果 データベース累積 50 件であった。

【2-7-2】FSW ver. の性能評価

目標値 データベース 30 件以上(累積) 結果 データベース累積 30 件であった。

1. 目的

計測ツールを用いて、多種多様なデータを分析することで現象を予知できる可能性がある。そのため、 多くのデータを蓄積する。

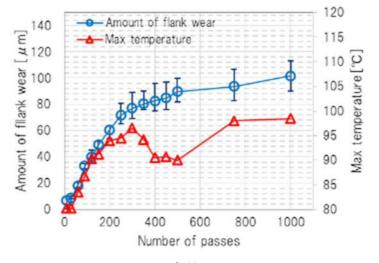
2. 工具磨耗と温度変化

エンドミルによる側面切削を行い、工具磨耗と計測ツールを用いた温度の関係を調査した。その際の加工条件を Table. 7-1 に示す。熱電対は底歯より 2mm の位置まで挿入した。切削パス数における温度(最高到達温度)および工具磨耗(逃げ面)の関係を Fig. 7-1 に示す。条件 2 における 5, 100, 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1200pass の工具磨耗写真を Fig. 7-2 に示す。本実験において、工具磨耗の進行に従い、いずれの条件においても工具内部温度が上昇していることが分かる。

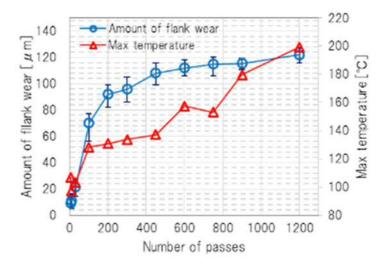
続いて、異なる材質においても工具磨耗と温度に差が生じるか調査した。上記検証にて磨耗させた工具および新品工具を用いて試験を行った。なお、上記条件 $1^{\circ}3$ で磨耗させた工具をそれぞれ old $1^{\circ}3$ とする。試験条件を Table. 7-2 に示し、各工具の最高到達温度を Fig. 7-3 に示す。なお、本検証の際は温度と振動を同時に測定できる計測ツールを用いている。計測データを Fig. 7-4 に示す。新品の工具に対し、磨耗した工具の最高到達温度はいずれも 100° 以上高い。 2 種類の材質にて検証したいずれも工具磨耗と温度には相関が見られた。温度と振動を同時に計測することで加工開始と同時に温度、振動の数値が上昇していることが分かり、加工現象をより複合的に解析することができる。なお、この際の振動は電圧値のまま評価している。

Table. 7-1 試験条件

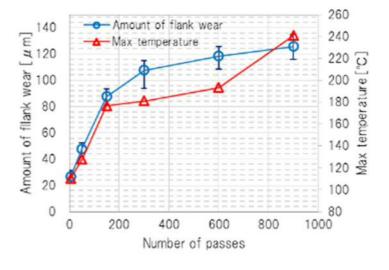
| 工作機械 | NV5000 α (DMG 森精機製) | |
|------|-----------------------------|---------------------------|
| 被削材 | FC250 (150×150×50) | |
| | 150mm/pass | |
| 使用工具 | エンドミル | TSC-EM4S(ミスミ) |
| | | 突き出し量:L/D=2.5 |
| | コレット | MC32-6-OH |
| 冷却水 | | 無し (ドライ) |
| 切削条件 | 条件 1 V=100m/min f=0.04mm/to | |
| | | ae=0.3mm ap=5.0mm |
| | 条件2 | V=200m/min f=0.02mm/tooth |
| | | ae=0.5mm ap=5.0mm |
| | 条件3 | V=263m/min f=0.01mm/tooth |
| | | ae=0.5mm ap=5.0mm |



条件 1



条件 2



条件3 Fig. 7-1 逃げ面磨耗と最高到達温度の関係

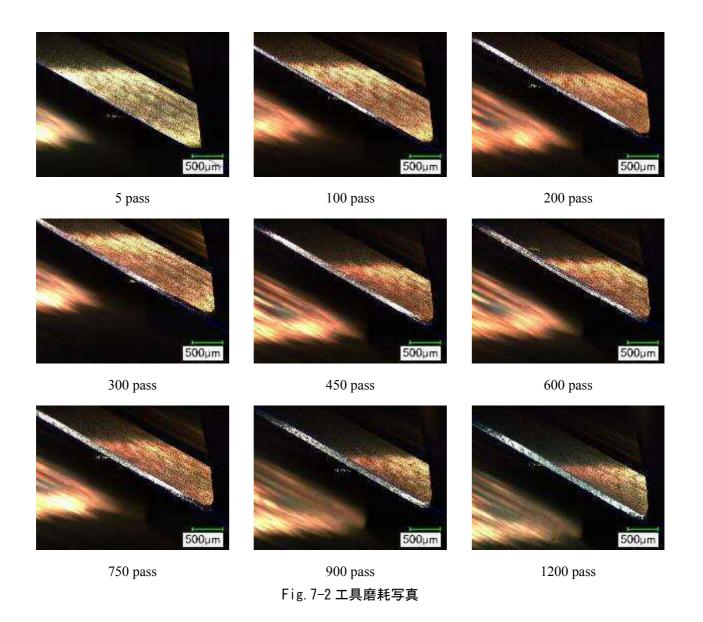
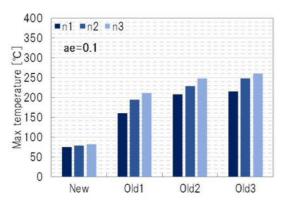
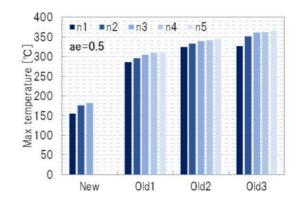


Table. 7-2 試験条件

| 工作機械 | ROBODRILL FRD α-D21LiB5(FANUC | |
|------|-------------------------------|------------------|
| | 製) | |
| 被削材 | \$50C (200×150×50) | |
| | 200mm/pass | |
| 使用工具 | エンドミル | TSC-EM4S (ミスミ) |
| | | 突き出し量:L/D=2.5 |
| | コレット | MC25-6-0H |
| 冷却水 | | 無し (ドライ) |
| 切削条件 | 主軸速度 | 3040 rpm |
| | 送り速度 | 0.04 mm/tooth |
| | 切り込み量 | Ap=5. Omm |
| | | Ae=0.1 or 0.5 mm |
| | 工具突き出し量 | L/D=3. 7 |





径方向切り込み 0.1mm の場合

径方向切り込み 0.5mm の場合

Fig. 7-3 エンドミルの最高到達温度

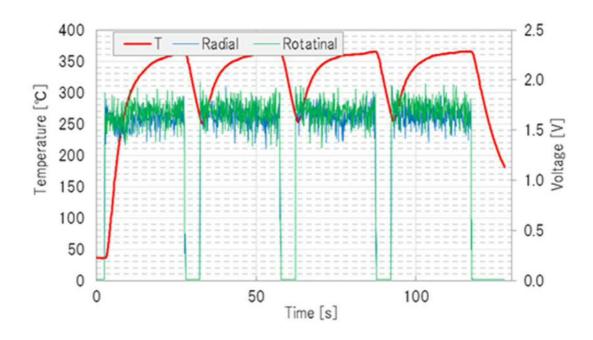


Fig. 7-4 温度+振動同時計測結果

3. 小径ドリル折損検知

振動版計測ツールを用いて、折損時の現象を検知できるか検証した。試験条件を Table. 7-3 に示す。他測定機方式とも合わせて検証するため、工作機械側の情報を取得するサーボビューア、切削動力計と同時に計測した。サーボビューアとは、ファナック社 CNC が搭載された工作機械と接続し、切削中の送り軸や主軸の位置、速度、トルクなどの情報を観測する PC ソフトである (Fig7-5)。切削条件 1,2 の結果をそれぞれ Fig. 7-6, Fig. 7-7 に示す。切削条件 1,2 ともに計測ツール、切削動力計ではドリル加工の現象を検知している。切削条件 1 の場合は、サーボビューアによる Load Meter (主軸モータ電流負荷モニタ)の結果もドリル加工現象を検知した。折損後のドリル先端がワークに届くだけの長さが残っていたため、いずれの測定方法においても折損後にも加速度を検知してしまっている。

一方で切削条件2では、折損した工具で加工した際に、動力計では折損前の波形とは異なるが折損後も力を検知しているが、計測ツールでは折損した工具で加工しているため、16穴目加工後の振動波形として無反応となっており、工具が折損したことを明確に検知できた。なお、サーボビューアによるLoad Meter(主軸モータ電流負荷モニタ)の結果では切削条件2では加工中も折損時ともに無反応である。

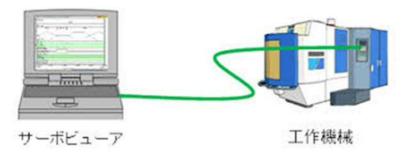


Fig. 7-5 サーボビューアによる工作機械情報取得

Table. 7-3 試験条件

| 工作機械 | ROBODRILL FRD α -D21LiB5(FANUC | |
|--------|---------------------------------------|--------------|
| | 製) | |
| 被削材 | | S50C |
| 使用工具 | エンドミル | EX-GDN φ0.5 |
| | コレット | テーパーコレット |
| 冷却水 | | 無し(ドライ) |
| 切削条件1 | 主軸速度 | 20m/min |
| | 送り速度 | 0.015 mm/rev |
| | 加工深さ | 3 mm |
| 切削条件 2 | 主軸速度 | 10 m/min |
| | 送り速度 | 0.015 mm/rev |
| | 加工深さ | 2 mm |

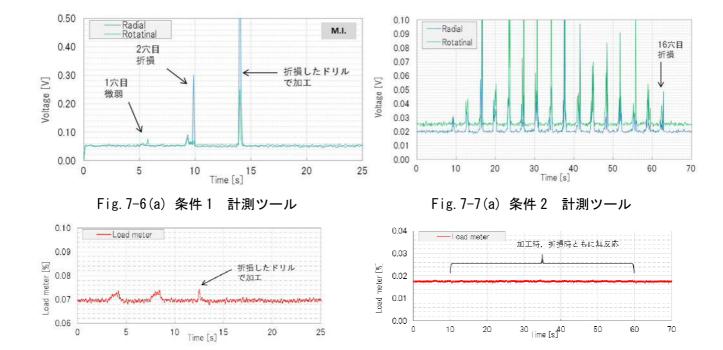


Fig. 7-7 (b) 条件 2 サーボビューア

Fig. 7-6(b) 条件 1 サーボビューア

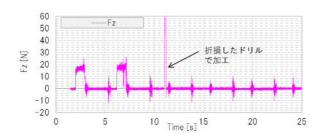


Fig. 7-6(c) 条件 1 切削動力計 Fig. 7-6 小径ドリルの振動検知(折損後検知あり)

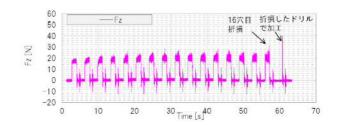


Fig. 7-7 (c) 条件 2 切削動力計 Fig. 7-7 小径ドリルの振動検知 (折損後後検知なし)

4. 摩擦攪拌接合 (FSW) 中の欠損検知

接合中の温度計測をリアルタイムで実施することで、欠陥の有無による温度データに差異が生じるかを検証した。Fig. 7-8 に示すように突合せ面にあらかじめ溝を作製し、接合を行った。接合に使用したツール形状はショルダ直径が 14mm、プローブは M4-M5 ピッチ 0.8mm の左ねじのテーパー形状、プローブ長は 4.5mm である。ツール内部の温度を計測する熱電対の概略図を Fig. 7-9 に示す。接合条件および欠陥残存の有無結果を Table. 7-4 に示す。溝の有無を比較するため、試験 No. 1 および No. 4 の計測結果を Fig. 7-10 に示す。プローブ先端の温度はツール挿入中の 9.6 秒の間に室温から 500 $^{\circ}$ 程度まで上昇、その後 5 秒の保持時間で 550 $^{\circ}$ まで上昇する。接合中は溝がない場合は 550 $^{\circ}$ で一定となるが、溝がある場合、溝付近で温度が 500 $^{\circ}$ まで低下する。

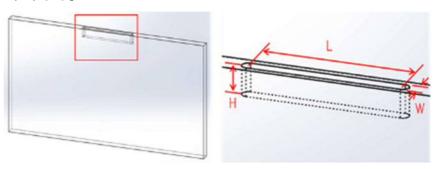


Fig. 7-8 溝形状

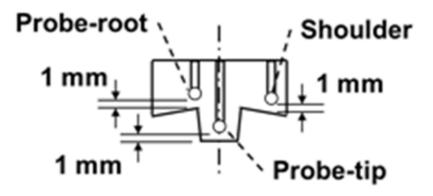
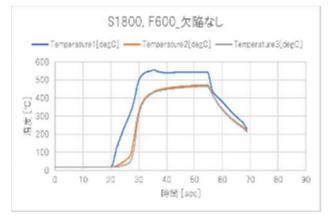


Fig. 7-9 ツール内部温度計測位置

Table. 7-4 欠陥検知検証用の接合条件および結果

| No. | 材料 | 回転数 | 送り速度 | 挿入量 | 挿入速度 | 保持時間 | 溝形状 | 残存欠陥 |
|-----|-------|-------|----------|------|----------|------|---------------------------|------|
| | | [rpm] | [mm/min] | [mm] | [mm/min] | [8] | $[L \times W \times Hmm]$ | |
| 1 | A6061 | 1800 | 600 | 4. 8 | 30 | 5 | 無 | _ |
| 2 | | 2700 | 900 | | | | 無 | _ |
| 3 | | 900 | 300 | | | | 無 | _ |
| 4 | | 1800 | 600 | | | | 30 × 1 × 5 | 有 |
| 5 | | 2700 | 900 | | | | 30×1×5 | 有 |
| 6 | | 900 | 300 | | | | 30×1×5 | 有 |
| 7 | | 1800 | 600 | | | | 100 × 1 × 5 | 有 |
| 8 | | 900 | 300 | | | | 10×1×5 | 有 |
| 9 | | 900 | 300 | | | | 30 × 1 × 0. 5 | 無 |
| 10 | | 900 | 300 | | | | 30 × 1 × 3 | 有 |



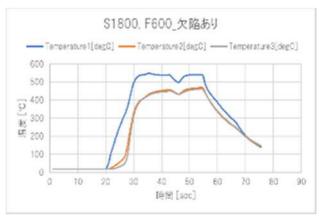


Fig. 7-10(a) 試験 No. 1

Fig. 7-10(b) 試験 No. 4

Fig. 7-10 FSW 中の温度計測結果

5. マシニングセンタによる摩擦攪拌接合 (FSW)

小型の切削型マシニングセンタによる FSW 中の温度、振動データを取得・検証した。接合材料は A6061 $(250 \times 75 \times 1t)$ とし、接合条件は Table. 7-5 に示す。表面に荒れが発生したものもあったが、温度や振動値にそれらの影響を顕著に示す傾向は見られなかった。良好な接合面が得られたものと表面に荒れが見られたものの接合面写真と接合中の温度データを Fig. 7-11、Fig. 7-12 に示す。

Table. 7-5 小型マシニングセンタによる接合条件および結果

| No. | 材料 | 回転数 | 送り速度 | 挿入量 | 挿入速度 | 保持時間 | 接合状態 |
|-----|-------|-------|----------|------|----------|------|-------|
| | | [rpm] | [mm/min] | [mm] | [mm/min] | [s] | |
| 1 | A6061 | 5000 | 1250 | 0. 9 | 30 | 5 | バリ多 |
| 2 | | 5000 | 2000 | 0. 9 | 30 | 5 | 良好 |
| 3 | | 5000 | 1000 | 0. 9 | 30 | 2 | バリ多 |
| 4 | | 5000 | 2000 | 0. 9 | 30 | 2 | 表面荒れ有 |
| 5 | | 5000 | 2000 | 0. 9 | 30 | 2 | 表面荒れ有 |
| 6 | | 5000 | 2000 | 0. 9 | 30 | 2 | 表面荒れ有 |
| 7 | | 5000 | 1667 | 0. 9 | 30 | 2 | 良好 |
| 8 | | 6000 | 2000 | 0. 9 | 30 | 2 | 表面荒れ有 |
| 9 | | 5000 | 1667 | 0. 9 | 30 | 2 | 良好 |
| 10 | | 4000 | 1333 | 0. 9 | 30 | 2 | 良好 |

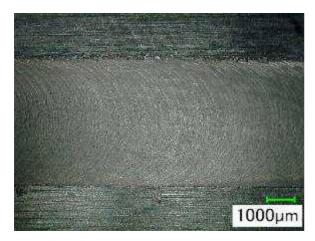


Fig. 7-11(a) 接合面写真

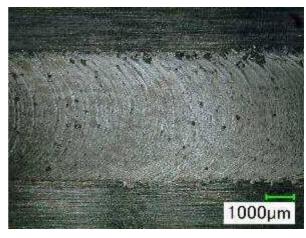


Fig. 7-12(b) 接合面写真

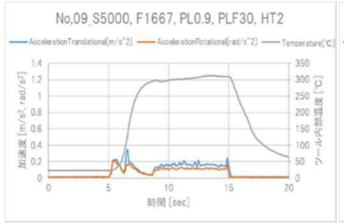


Fig. 7-11 (b) 接合中の計測データ Fig. 7-11 試験 No. 9 良好な表面となった接合

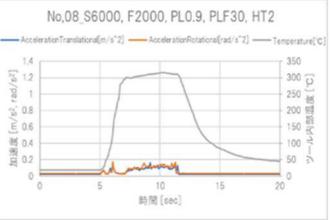


Fig. 7-12 (b) 接合中の計測データ Fig. 7-12 試験 No. 8 表面に荒れが見られた接合

第3章 全体統括

3-1 研究開発成果

本研究では、Fig. 8 に示す無線計測システムにより回転工具における複数指標(温度・振動)によるリアルタイム計測技術を開発した。開発した計測ツールを Fig. 9 に示す。小型の工具である BT30 シャンクのホルダにも納まるように電子機器を最適配置している。開発した計測ツールを用いたリアルタイムモニタリングの計測画面を Fig. 10 に示す。計測ツールは 20,000rpm の高速回転においても無線が途切れることなく、200Hz のサンプリングを可能としている。1 回の充電で 100 時間の連続計測をすることも可能な機種も開発した。



Fig.8 無線計測システム



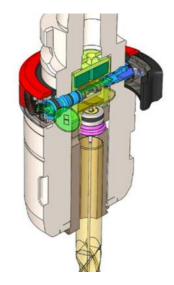


Fig. 9 計測ツール外観と内部構造



Fig. 10 温度・振動の同時計測画面

3-2 事業化展開

株式会社山本金属製作所ではこれまでに加工現象を計測できるツールとして温度 ver. を販売している。 工具刃先温度を計測することは工作機械側からのセンシング技術ではできないため、一定の需要を取り込んできた。本研究の成果である振動を加えた温度・振動を計測できるツールを事業化(販売・サービス) することにより、加工現象をより詳細に把握できるようになるため、川下産業の生産技術部門への活用がより期待される。

また、工作機械との連動による予防処置等のプロセスイノベーションや加工現象の数値化による技能伝 承が波及効果として見込める。