

熊本県産業技術センター

# 研 究 報 告

第 57 号 令和 3 年度

.....  
REPORTS OF  
KUMAMOTO INDUSTRIAL RESEARCH  
INSTITUTE  
No.57 2021.4-2022.3  
.....

令和 4 年 (2022 年) 12 月

熊本県産業技術センター  
〒862-0901 熊本市東区東町 3-11-38

Published by  
Kumamoto Industrial Research Institute  
3-11-38, Higashi-machi, Higashi-ku, Kumamoto 862-0901 Japan



---

# 熊本県産業技術センター研究報告

第 57 号 (令和 3 年度)

## 目 次

---

### 【技術資料】

ICT 及びデザイン技術を活用した生産性の見える化に関する研究 .....	佐藤達哉 .....	1
	石橋伸介	
	渡辺秀典	
	松尾英信	
	黒田修平	
電磁環境推定モデルを使用したノイズ計測の信頼性向上に関する研究 .....	前田和輝 .....	7
	道野隆二	
	松枝寛	
	黒田修平	
	朝長伸吾	
	山口良一	
【転 載】		
エンドミルの微小切込み切削による表面改質 .....	川村浩二 .....	12
砥粒加工学会誌, Vol. 66, No. 10, pp. 562-565 (2022)	坂本重彦	
	村井満	

---

REPORT OF  
KUMAMOTO INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE

Vol. 57 (2021. 4–2022. 3)

CONTENTS

---

**【Technical Reports】**

Research on Productivity Visualization Utilizing ICT and Design Technology

SATO Tatsuya, ISHIBASHI Shinsuke, WATANABE Hidenori, MATSUO Hidenobu and

KURODA Shuhei ..... 1

Validation of Reliability Improvement of EMI Measurement Using on

Electromagnetic Environment Estimation Model

MAEDA Kazuki, MICHINO Ryuji, MATSUEDA Hiroshi, KURODA Shuhei, TOMONAGA Shingo and

YAMAGUCHI Ryoichi ..... 7

**【Reprinting】**

Study on surface modification machined by micro end milling processes

KAWAMURA Koji, SAKAMOTO Shigehiko and MURAI Mitsuru ..... 12

Journal of the Japan Society of Grinding Engineers, Vol. 66, No. 10, pp. 562–565 (2022)

# ICT 及びデザイン技術を活用した生産性の見える化に関する研究

佐藤 達哉\*・石橋 伸介\*・渡辺 秀典\*・松尾 英信\*・黒田 修平\*\*

\* 技術交流企画室、\*\*ものづくり室

## Research on Productivity Visualization Utilizing ICT and Design Technology

SATO Tatsuya\*, ISHIBASHI Shinsuke\*, WATANABE Hidenori\*, MATSUO Hidenobu\*, KURODA Shuhei\*\*,

急激に社会環境が変化していく現代において、中小企業が事業を継続・発展させていくためには、これまでにない大胆な解決策や新しい切り口のビジネスモデルの創出、他社との強い差別化が求められている。そこでデザイン技術が得意とする多様な視点と柔軟で大胆な発想をより効果的に活用するため、ICT技術によるデザイン手法の見える化を検討した。さらに、競合他社と差別化し人材の確保や新規事業の創出、事業の拡大等を実現していくために、企業が持つ強みを活かしたブランド力強化のための支援ツールの検討を行なった。

### 1. はじめに

少子高齢化による労働人口の減少、国際情勢及び経済の不安定性など急激な社会環境の変化により、中小企業は人手不足や製造業離れ、構造不況、及び働き方改革など様々な問題に直面している。また、頻発する災害や環境問題への意識の高まり、情報化社会の進展などを背景として人々の価値観が大きく変化し、機能的価値だけでなく情緒的価値の比重が大きくなり、製造業全体において大きな変革が求められてきている。

こうした状況の中で、地方の中小企業が優秀な人材を確保し、数ある競合の中から選ばれて事業を継続・発展させていくためには、①これまでにない大胆な解決策、②新しい切り口のビジネスモデルの創出、③他社との強い差別化が求められている。しかし、多くの中小企業にとって既存事業とは異なる新たな取り組みに対する経験や知識はあまり無いのが現状である。また、人材確保のため労働条件や環境を整え、設備や技術力を補強していただければ他社との差別化は難しい。そこで必要となるのは、①自社が抱える問題や課題を把握し、その解決に向けて柔軟で大胆な発想を効果的に発揮すること。また、②自社の強みに対する理解を深め他社との差別化を強化していくことである。

そこで本研究では、課題の発見や新たな発想を支援するために有効なデザイン技術と複雑な情報を見える化するICTに着目し、①ICTを用いたデザイン支援に関する研究と②ブランド力を強化するための支援ツールの開発という2つのテーマについて中小企業の課題解決に向けた取り組みを行うこととした。

### 2. ICT 技術を用いたデザイン支援に関する研究

当センターでは、課題解決に向けたデザイン支援を行うにあたり、ビジネスモデルキャンバス(以下、BMC)の様なフレームワークを活用している<sup>1)</sup>。問題の考え方や答えの出し方に必要な視点を網羅したフレームワークは、組織内や企業間での協業・共創を検討する際、開発メンバーの意見やアイデア等に見える化し、共通認識を持つための設計図的な役割を果たすことから、スピーディーな問題解決や意思決定に効果的である<sup>2)</sup>。一方で、フレームワークを使いこなすためには、ある程度のトレーニングが必要である。経験上、当センターの県内企業に対するデザイン活用支援においても、デザイン手法に不慣れなため、フレームワークを上手く埋められないことが多く見受けられる。この様な場合、現状では、当センター職員がフレームワークの役割や詳細について指導しながら完成に導いているが、個別対応となり多くの時間を費やしている。そこで、PC・スマートフォン等のデジタル機器や情報処理・通信技術等を取り入れてコミュニケーションを支援するICT技術を活用することで、初心者でもデザイン手法を学習しながらフレームワークを使いこなす方法がないか検討を行った。

#### 2.1 支援方法の考察

初心者がフレームワークを埋められない要因の一つとして、ブロックのタイトルだけでは、何を、どの程度まで具体的にイメージする必要があるか分からないことが挙げられる。例えば、ビジネスモデルを考える際に広く使われているBMC<sup>2)</sup>には顧客セグメントというブロックがあり、そこにはターゲット

ユーザーのイメージを記述していく。この時、BMCを使い慣れていないと、都会暮らしで20代前半の働く女性といった抽象的なイメージを記述してしまい、ビジネスモデル検討に繋がっていかない。これは、どのようなキーワードが上がっていると後のアイデア具現化等が行いやすいかといった視点や経験が欠けているためと考えられる。そこで、当センターのデザイン支援では、フレームワーク初心者に対し、ファシリテーション（舵取り）<sup>3)</sup>を行っている。具体的には、顧客セグメントは誰？の様な抽象的な質問ではなく、ユーザーは何に困っていますか、それはどんな場面ですか、それがどう変化すると魅力を感じてくれますかとユーザーの多様な側面について質問を繰り返し、具体的なイメージへと落とし込む様にしている。実際、この様な多様な質問の繰り返しがヒントとなって、開発担当者はフレームワークを効果的に使えるようになることは多く見受けられる。

そこで、このフレームワーク作成のヒントとなる設問の出題と回答を繰り返すシステムをつくることで、フレームワーク完成に導くデザイン支援ができるのではないかと考えた。

## 2.2 デザイン支援方法の見える化

ファシリテーションでは、製品やサービスを成立させるユーザー、機能、及び造形等が決定される理由や、その関係などデザイン上重要なキーワードを導出する質問を行っている。そこで、回答で得られるキーワードをデザイン解と仮定義し、デザイン解を導く質問を抽出する方法について検討した結果、リバースデザインを行動観察する方法を採用した。永田宙郷氏が考案<sup>4)</sup>したリバースデザインは、リバースエンジニアリングの様に完成品からデザイン解を推測する手法で、デザイン学習や競合品の分析などに有効である。今回は、当センターの研究員に、自宅で醤油ができるキットのリバースデザインを行なってもらい、その様子を観察することで、デザイン解を得るための質問の抽出を行った（図1）。

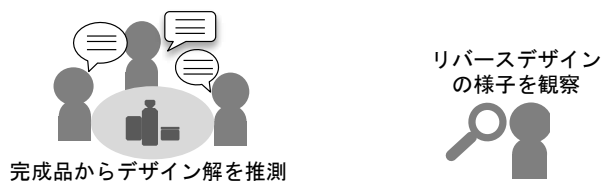


図1 デザイン解抽出の様子

今回のリバースデザインでは、完成品を観察して、想定するユーザーの具体像や提供している価値、具

体的な機能や造形、コンセプトなど幅広いデザイン解の推測を行った。その観察では、リバースデザインで得られるデザイン解と、その解を得るためにどんな質問をしたかに着目、デザイン解と質問を対にする形で抽出を行なった。その一部を表1に示す。

表1 抽出したデザイン解と質問の対（一部抜粋）

プロダクトはどういう仕組みなのか？ 既存のプロダクトとの違いを正確に言うと？	
デザイン解	デザイン解を得るための質問
○4週間で1回完成する	・どのくらい使用できますか？ ・サービスが完成/完了するまでの時間は？
○発酵体験ができる	・商品で何ができますか？
○食育になる	・ユーザーに何をさせたいですか？
○醤油のフレッシュさにこだわり有り	・その商品のこだわりは何ですか？ ・どうやって、こだわりを実現していますか？
○使い切った頃に原液が届く	・サービスを継続する/買い続けてもらう仕掛けはありますか？
○自分好みの醤油を楽しめる	・ユーザーはどんな体験ができますか？
○・・・	・・・・

リバースデザインはデザイン解の推測なので全てのデザイン解が抽出される訳ではないが、表1だけでも多様なデザイン解が得られていることが分かる。一方で、デザイン解を得るための質問は、それぞれ簡潔で答えやすいシンプルなものとなっている。実際にデザイン支援でファシリテーションする時も、この様なシンプルな質問を繰り返し、キーワードを獲得していくので、フレームワーク作成のヒントとなる質問を得られていると考えられる。しかし、このまま質問を羅列しても、フレームワークを埋めるヒントとしては散漫になってしまうので、得られた質問群について、実際のフレームワークのブロックごとに分類を行った。今回は、BMCの9ブロック中、可能性側の4ブロック（顧客セグメント、価値提案、顧客との関係、チャネル）に分類を行ったので、その一部を表2に示す。

分類した質問群について、実際のデザイン支援に使用可能か検証するためのケーススタディを行った。ケーススタディは、当センターに相談のあった補助事業申請やビジネスコンテストのエントリー等の案件において、ビジネスモデルの構築や検証に適用を試みた。その結果、作業の取り掛かりとして、具体的なイメージで検討しやすかったといった感想や、例えば、ヘルスケアサービスのビジネスモデル構築で、健康向上のようなユーザー視点の価値しか検討していなかったが、医療費削減など社会的価値も提供できることに気が付いたなど、多様な視点を補足する効果についても評価を得ることができた。一方で、質問群には、検討中の商品やサービスには関係ない、ビジネスモデルの価値を高める上で重要な

表2 BMC(可能性側)に分類した質問群 (一部抜粋)

<b>1 顧客セグメント：顧客は誰？</b>
○誰が使用しますか？ ○どんなときに使用しますか？ ○ユーザーは何に困っていますか？ ○どうなると喜びや楽しさを感じますか？ ○.....
<b>2 価値提案：コアとなる提供価値は？</b>
○ユーザーはどんな体験ができますか？ ○商品で何ができますか？ ○社会的価値は何ですか？ ○.....
<b>3 チャネル：どう売る？</b>
○どこで入手できますか？ ○どのくらい使用できますか？ ○使い切りですか？継続できますか？ ○.....
<b>4 顧客との関係：顧客にどう思われたい？</b>
○似た様な商品・サービスはありますか？ ○その商品のこだわりは何ですか？ ○その商品にしかできないことは何ですか？ ○使い続けたいくなる理由は何ですか？ ○.....

いと判断できる質問も含まれていた。これは、リバーデザインを行なった商品とケーススタディで取り上げた商品の性質が異なるため、ある商品やサービスでは重要な質問でも、別のタイプの商品では重要でない、必要ない質問もあるためと考えられる。そのため、質問の意味がよく分からない、全てを回答しなくても良いのではという感想も得られた。また、質問群で得られたものは回答群であって、ブロックを埋めるにあたり、重要度の高い回答から低い回答まで混在して、羅列されている。そのため、共通認識を持つための設計図的なレベルまでBMCの完成度を高めるためには、重要度に応じて必要な回答を選択し、他のブロックの回答と調整を図る等を行う必要があった。

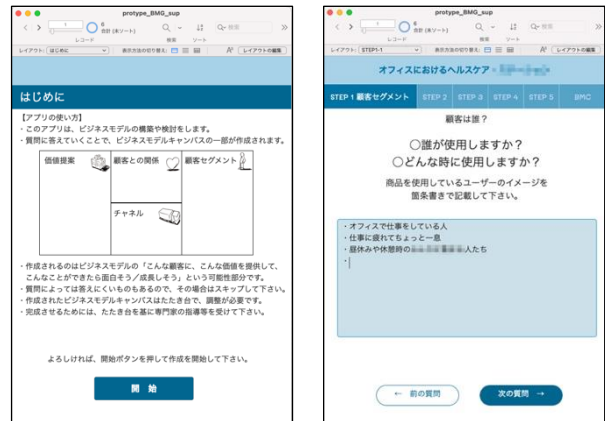
ケーススタディの結果から、リバーデザインで得られた質問群は、初心者へのフレームワーク作成支援に有効であること、質問群は競合品など商品やサービスのイメージに近いものから抽出した方がより適切な質問群が得られることが分かった。また、質問群に回答すれば自動的にフレームワークが完成する訳ではなく、導けるのは原案までである。完成させるためには、製品やサービスに合わせた更なる調整を図る必要があることから、フレームワークを作成する手始めの段階に用途を限定し、その後の調整は熟練者の指導等を組み合わせるといった活用が効果的と考えられる。

### 2.3 カスタムアプリの試作評価

リバーデザインで得られた質問群がフレームワークを作成支援に有効と考えられることから、ICT技術を活用し、ビジネスモデルを構築、検討したいBMC初心者に対し、質問と回答を繰り返してもらうこと

で、BMC(可能性側)の原案ができるアプリの試作を試みた。なお、試作は、ローコードでカスタムアプリ開発が行えるClariss社のFilemaker Proを用いて行なった。試作したアプリの画面を図2に示す。

アプリは、最初に使い方やBMC(可能性側)の概要を説明、次にブロック単位で出題される質問に対して回答を入力、最後に完成したBMC(可能性側)の原案を表示という手順になっており、今回のケーススタディを用いて完成させた事例を図3に示す。



(開始時の説明画面) (質問～回答画面)

図2 試作したアプリの画面 (一部)

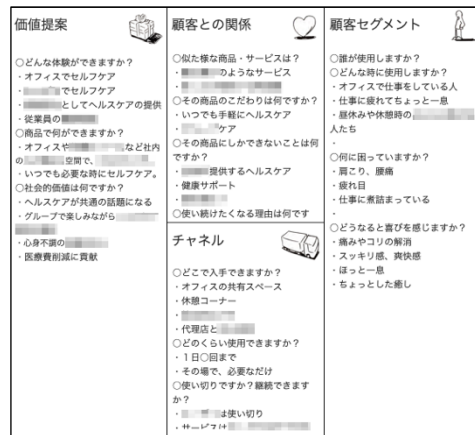


図3 アプリで作成されたBMC(可能性側)の原案

アプリを試用した感想としては、最初の説明により全体像を把握して作業を進められた、ただフレームワークを提示されるより作業しやすかったなどの好意的な反応を得ることができた。また、答えにくい質問があり、どうして良いか分からなかった、進めていくうちに前の回答を修正したくなるが、その質問がどこにあるか分からなかった、対話のようなニュアンスを感じられず、回答しにくい時があったなどの感想や、このアプリを使って他社製品について回答していくと競合品のビジネスモデルの分析ができるのではといった提案もあった。

このような結果から、今回、試作したアプリは、初心者のビジネスモデル構築や検討において、原案レベルの完成度を目標とするのであれば有効に機能すると考えられる。しかし、商品やサービスの特徴によっては回答しにくい質問があることや答えているうちに後から回答を修正したくなる場合もあることから、答えにくい質問を飛ばせるようにする、質問群の全体像を確認しながら回答できるようにするなどの改善も必要であることが分かった。フレームワークは当センターのデザイン支援において多く用いられる手法であることから、より効率的にフレームワークが活用できるように、今後も改良を重ねて、実用化を目指していく。

### 3. ブランド力強化支援ツールの開発

ブランドを構築し強化していくためには、企業が自社や周辺環境についてしっかりと把握し、それらの情報の中から自社の存在意義や事業の目的を明らかにする。さらに、より多くの人に伝わりやすくするために言葉やイメージに凝縮していく、などの多くの要素や行程を必要とするため、中小企業にとっては、ハードルの高い取り組みとなっている。そこで本項では、中小企業がブランドを事業活動に取り入れやすくすることを目的として、ブランドの構築及びブランド力の強化につなげるためのフレームワークやワークショップ手法をセットにしたブランド力強化支援ツールの開発について研究を行った。

具体的には、これまでの研究<sup>1)</sup>によりブランド構築に必要な要素を「強み」、「意思」、「環境」の3つと定義し、それらを抽出・整理するための手法を検討する。次に、抽出したブランド要素をもとにビジョンを確立。さらにビジョンを凝縮・洗練させることでブランドの構築及び強化を目指す(図4)。

#### 3.1 ワークショップによるブランド要素の抽出

自社だけの強みを見つけ出すには、客観的かつ多様な視点から議論を進めていくことが不可欠となる。そこで、出来るだけ多くの情報を抽出する方法として、ワークショップ形式<sup>5), 6)</sup>でのグループディスカッションを取ることとした。ワークショップ形式の特徴として、事前の準備等は必要であるが短期間でたくさんの意見を集められることや、当事者に主体的に参加してもらうことで議論した結果に対する納得度が高くなること、様々な意見に触れることで新たな発見や視点が生まれることなどがある。ワークショップ形式で重要となるのが、チームとプロ

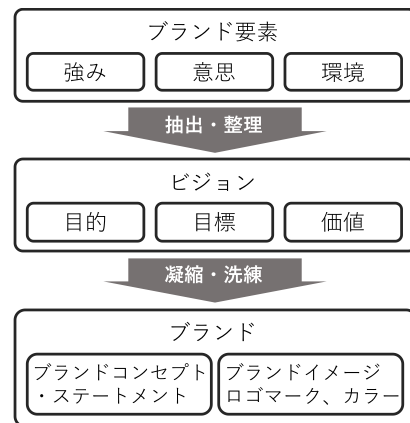


図4 ブランド要素、ビジョン、ブランドの関係

グラムとファシリテーションの3つである。まずチームについては、客観的かつ多様な視点を入れるために、社内のメンバーは出来るだけ色々な部署から参加してもらうこと、可能であれば外部の人間も参加できることとした。プログラムについては、以前開発したブランドシート<sup>1)</sup>をベースに、ブランディングデザイン<sup>7)</sup>やビジョンデザイン<sup>8), 9)</sup>等のデザイン手法を参考に独自開発したビジョンシート(図5)を使って、各要素もしくは要素間の関係について議論していくことで、企業の使命や目標、価値観からなるビジョンの構築を目指す。ファシリテーションについては、進行やポストイットの使い方、意見の集約など経験やノウハウが必要になるため、初期段階ではセンター職員が行い、徐々に社内のメンバーに主導権を渡していくこととした。

ワークショップ手法のケーススタディとして、県内のシステム開発を行う企業(S社)の支援に適用し検証を行なった。S社では、自社商品・サービスの開発と新規顧客の獲得が課題となっている。そこで、ワークショップによるブランド要素の抽出と企業のビジョン確立を行なった。チームは、S社の社員4人と、当センターから2名(デザイン担当と情報担当)が参加し、S社の「強み」「意思」「環境」について、ディスカッションを行なった。その結果、これまでの業務で培った、設備とシステム設計に関する知識や対応の速さ及び柔軟性などを強みとして見出すことができた。さらに、意思や環境などの要素をもとに事業の目的や自社のあるべき姿及び大切にしている価値などを検討し、最終的に「Smart × Support (スマートバイサポート)」というビジョンを構築し、行動指針も設定することができた。現在、ビジョンや行動指針をベースとして、新たな事業創出に向けた独自のサービスやビジネスモデルのデザインを進めている。



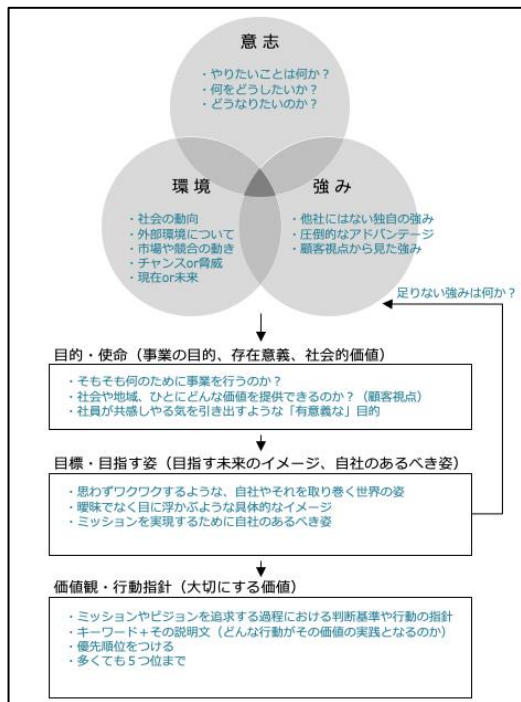


図5 ビジョンシート

### 3.2 ブランド構築に向けたコンセプトの作成

ブランドを構築していくためには、ビジョンシートに書き込まれた使命や目標、価値観の内容を社内はもちろんお客様や関係者に伝達、共有できるように文章やイメージとして可視化する必要がある。

まずブランド要素を凝縮して20文字以内の短い文章を作成していく。これはブランドコンセプトと呼ばれ、言葉を極限まで削ぎ落とし洗練させて、そのブランドの核となる価値を表現したものである。さらに、ブランドコンセプトを詳しく説明したブランドステートメントと呼ばれる200~400文字程度の文章も作成する。このブランドコンセプトおよびブランドステートメントの作成はブランドの主軸となる重要な要素である。

ケーススタディとして、小国町で畳を製造販売しているA社のブランド構築を支援した。A社では、これまでのBtoB主体の事業から第2の柱としてBtoC事業に取り組み始めており、一般の消費者とのコミュニケーションをベースとするブランド構築が大きな課題となっていた。A社とは、過去の支援の中でデザイン要素についての議論を進めていたため、それをもとにビジョンシートを作成した。その結果からブランドコンセプトについて様々な言葉の組み合わせから案を作成し、最終的に議論に参加したA社のメンバー全員が納得できるブランドコンセプトを決定することができた。さらに、コンセプトの詳しい説明としてブランドステートメントも作成した(図6)。



図6 ブランドコンセプト、ステートメント

### 3.3 ブランドイメージ構築のためのデザイン支援

次の段階では、コンセプトやステートメントとして凝縮されたブランドを目に見える形へと変換していく。ここでは、ブランドのロゴやテーマカラー、Webページ、パッケージ、名刺などお客様や関係者との接点となるあらゆる要素を統一感のあるイメージでデザインしていく。お客様にコンセプトのメッセージ性と調和したイメージが様々な場面で繰り返しインプットされることで、ロゴやカラーを見るだけで企業や商品が想起され、「〇〇(商品、サービス)といえば□□(企業名)だよな」というイメージの定着が期待できる。このイメージの定着こそがブランド力の強化へとつながっていく。

このフェーズでは、ロゴやパッケージなどのクリエイティブを担当するデザイナーとの協業が鍵となる。ブランド力の強化においては、上でも説明したように、短期間で成果が出ることは難しく長期間の一貫したイメージ戦略が必要となる。当然、担当するデザイナーもロゴだけWebページだけという単発の関わり方ではなく、クリエイティブ全体について長期にわたって関わっていくことが望ましい。

ここで問題となるのが、企業とデザイナーとのマッチングと相互のコミュニケーションである。デザイン開発の経験の乏しい中小企業にとっては、そもそもデザイナーとの繋がりもなく、誰をどうやって選べば良いかわからないことがほとんどである。また、依頼をする際や提案されたデザインについてやり取りをする際も専門性の違いなどからうまくいかないことが多い。そこで、企業とデザイナーとのマッチングや初期段階での相互のコミュニケーションを当センターのデザイン担当者が仲介、サポートし、ある程度の信頼関係が築けた後は、直接やり取りができる体制へとシフトしていくこととした。

ケーススタディとして工場野菜の生産と販売を行っているN社のブランドイメージのデザインを支援した。N社は独自の工場野菜の生産システムを構築し、「健康野菜村」というブランド名で、レタスなどの野菜を販売している。事業の拡大に向けて、これま



図7 ロゴやパッケージ、キャラクターのデザイン

でのスーパーなど小売への卸に加えて、ネット通販や、デパート等で取り扱うなどの取り組みを始めていた。その中で、既存の商品との差別化が課題となっていた。そこでまず、ブランドコンセプトに込めた想いやこだわり及びお客様との関係性についてヒアリングを行い情報の収集と整理を行った。次に、食品関連のデザイン経験が豊富で、柔らかで親しみやすいデザインテイストが得意なデザイナーを紹介し、ヒアリングの内容を共有しながら、ロゴマークやパッケージ、キャラクターのデザインを行なった(図7)。結果、デザイン案の作成から最終デザインの決定まで短期間でスムーズに行うことができた。

### 3.4 ブランド力強化支援ツール開発まとめ

以上、本項では、ビジョンシートを使ったワークショップ手法と、ブランドコンセプトの作成手法およびブランドデザインのためのデザイナーとのマッチングのサポートという3つのフェーズからなるブランド力強化支援ツールの検討を行なった(図8)。

ここまでに紹介した企業以外にも、県内の企業数社を対象にケーススタディを行い、ブランド構築や社内の意識向上、新商品開発などの成果に繋がるなど概ね良好な結果が得られた。一方で、ワークショップの進め方やワークの分量によって回数が増えてしまい想定以上に期間が掛かってしまうこと、プロジェクトチームの編成やファシリテーションの仕方によって参加者の発言量や参加意欲に差が出てしまうことなどの課題があることもわかった。

## 4. おわりに

本研究では、リバースデザインによるデザイン手法の見える化、フレームワーク作成支援におけるICT活用、ブランド力を強化する支援ツールの開発を行なうことで、課題の発見や新たな発想の支援について検討を行った。それぞれでケーススタディを行なったデザイン開発の場面では、企業や商品等が抱える課題や現状等をどのように捉えるかによって、その後の解決策や成果が大きく異なってくる。その捉え

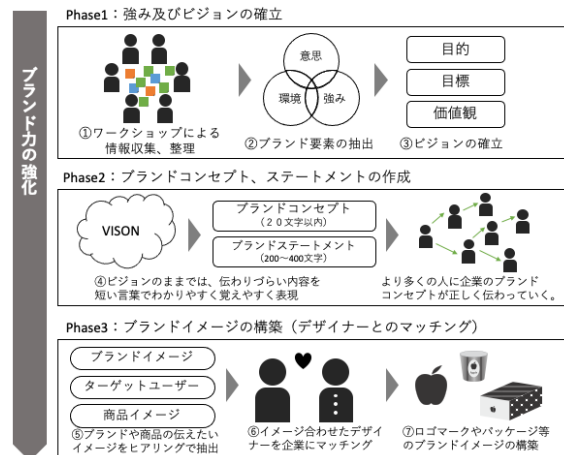


図8 ブランド力強化支援ツールのイメージ

方はデザイン経験によるところが大きく、経験の少ない者には取り掛かりにくいものであるが、今回検討した手法等により、初心者や専門家でない人達にもデザイン手法による課題解決が浸透して行ければと思う。

## 参考文献

- 1) 石橋伸介, 佐藤達哉, 黒田修平, 松尾英信, 永岡昭二, 森山芳生, デザイン思考によるニッチ市場創出のための研究開発. 熊本県産業技術センター研究報告, 2019, 第55号, p1-6
- 2) 曾根原士郎. ”今こそ知りたい「ビジネスモデルキャンパス」のメリットと活用のポイント”. MANA-Biz. コクヨ株式会社. 2020-12-19.  
<https://www.kokuyo-furniture.co.jp/solution/man-a-biz/2020/12/post-521.php>, (参照 2022-07-02)
- 3) 特定非営利活動法人日本ファシリテーション協会, “ファシリテーションとは”.  
<https://www.faj.or.jp/facilitation/>, (参照 2022-07-02)
- 4) 永田宙郷, 講演会「デザインのトリセツ」内で提唱, DESIGN EXPO 2015 in KUMAMOTO, 2015-10-06.
- 5) 堀公俊, 加藤彰, ワークショップデザイン-知をつむぐ対話の場づくり, 日本経済新聞, 2008
- 6) 安斎勇樹, 塩瀬隆之, 問いのデザイン-創造的対話のファシリテーション, 学芸出版社, 2020
- 7) 西澤明洋, 中川淳, ブランドのはじめかた, 日経BP社, 2010
- 8) 田子學, 田子裕子, 橋口寛, デザインマネジメント, 日経BP社, 2014
- 9) 佐宗邦威, 直感と理論をつなぐ思考法-VISION DRIVE N, ダイアモンド社, 2019

# 電磁環境推定モデルを使用したノイズ計測の信頼性向上に関する研究

前田 和輝\*・道野 隆二\*・松枝 寛\*・黒田 修平\*・朝長 伸吾\*・山口 良一\*\*

\* ものづくり室、\*\* 技術交流企画室

## Validation of Reliability Improvement of EMI Measurement Using on Electromagnetic Environment Estimation Model

MAEDA Kazuki\*, MICHINO Ryuji\*, MATSUEDA Hiroshi\*, KURODA Shuhei\*, TOMONAGA Shingo\*  
and YAMAGUCHI Ryoichi\*\*

電子機器を販売するためには電気用品安全法等に規定されている様々な電磁ノイズ試験をクリアしなければならない。電磁ノイズ試験は電波暗室等の特別な設備で試験されるため、設備を保有していない県内中小企業は、外部の試験機関を利用しなければならない。コスト面（経済的、時間的）での課題がある。本報告では、電磁ノイズ試験の一つである雑音端子電圧試験に着目し、各企業内で電磁ノイズ試験を実施するための治具の開発や測定方法の検証を行い、実際に電磁ノイズ試験を実施した。

### 1. はじめに

昨今のデジタル化の推進により、情報機器を始めとした様々な電子機器が普及している。電子機器を販売するためには、電磁ノイズ規格（EMC規格：Electro-magnetic Compatibility 電磁両立性）に対応しなければならない。一方、電子機器の小型化・高速化・高機能化により、EMCの対策が複雑化しており、多くの企業でEMC対策が課題となっている。

電子機器の製品設計は主に図1のような工程で行われるが、電磁ノイズ試験に不合格であった場合、合格するまで試験と対策を何度も繰り返さなければならない。また、電磁ノイズ試験は外来電波を遮蔽した電波暗室で実施されるため、電波暗室を保有していない企業は外部の試験機関を利用することになる。電波暗室は非常に高額で中小企業では保有することは難しい。社外の試験機関を利用したとしても使用料の負担、試験機関までの移動などの時間が必要で、製品開発における効率化のボトルネックとなっている。

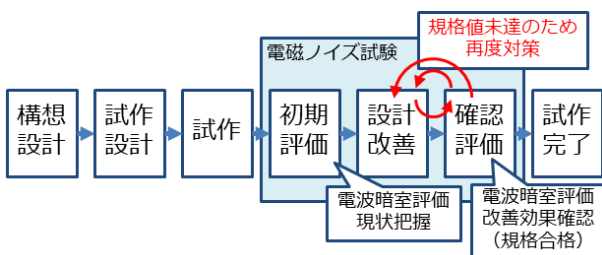


図1 製品設計における電磁ノイズ試験および対策

そこで、本報告では、電磁ノイズ試験の1つである雑音端子電圧試験を対象とし、企業内で試験を実施できるようにするために、測定に必要な治具の開発や測定方法の検証を行った。

### 2. 雑音端子電圧試験

雑音端子電圧試験は、電気用品安全法を始めとした各国、各団体の規格に定められている試験で、主に電源線に沿って伝搬する電磁ノイズが規制値以内であることを評価する試験である。<sup>1) 2)</sup>

雑音端子電圧試験は図2のような試験配置で行われる。

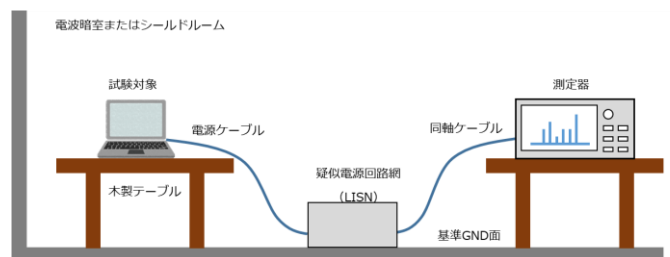


図2 雑音端子電圧試験の配置図

雑音端子電圧試験で用いられる疑似電源回路網は次の機能を持つ。

- ・電源回路のインピーダンスを一定にする。
- ・電源に重畳する不要なノイズを分離する。
- ・妨害波電圧を測定用受信機に出力する。

疑似電源回路網は規定のものを購入すると高価であり、使用頻度に対しての効果は望めない。そこで

簡易的に疑似電源回路網を自作することで、疑似電源回路網にかかる費用を1万円以下に抑え、企業内でも簡単に雑音端子電圧を計測できる仕組みを構築する。

## 2.1 疑似電源回路網の作製

疑似電源回路網は、CISPR16-1-2<sup>3)</sup>で規定されており、50Ω/50μHの疑似電源回路網の回路図と各回路定数を図3に示し、作製した疑似電源回路網を図4に示す。

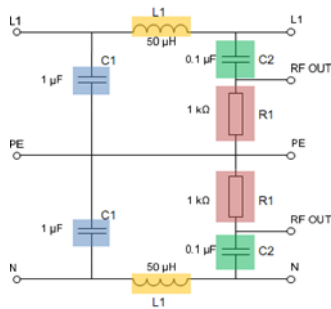


図3 疑似電源回路網の回路図

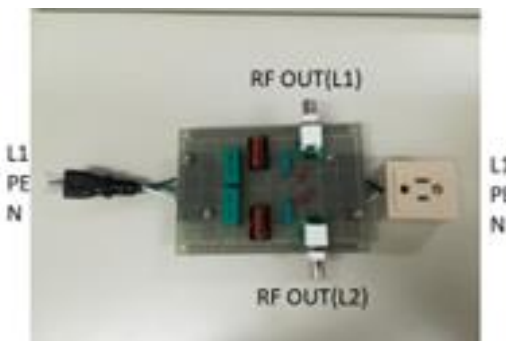


図4 作製した疑似電源回路網(KIRI-LISN)

## 2.2 疑似電源回路網の評価

CISPR16-1-2では、疑似電源回路網の電圧分配係数(VDF)を測定し、雑音端子電圧試験の測定時に考慮すべきことが規定されている。そこで、測定治具を作製し、疑似電源回路網の電圧分配係数の評価を行った。測定系を図5に測定結果を図6に示す。図6の破線は当センターのEMC試験で使用している協立テクノロジー社製の疑似電源回路網KNW-242Cの電圧分配係数で、R2年度に外部の校正機関で測定したものである。測定した結果と比較するとKNW-242Cの特性と概ね一致しており、十分使用できる範囲の特性が得られた。

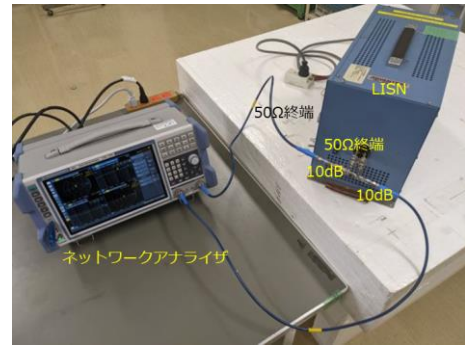


図5 疑似電源回路網の電圧分配係数の測定系

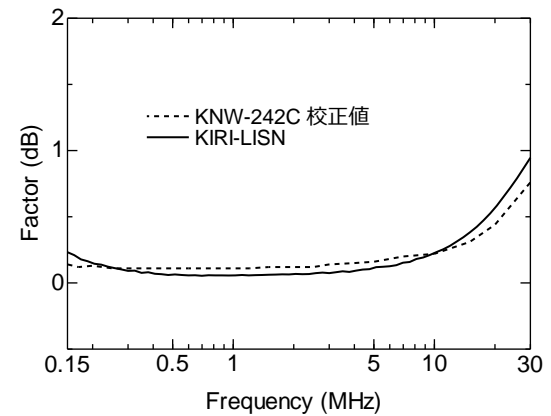


図6 疑似電源回路網の電圧分配係数

## 2.3 雑音端子電圧試験での評価

作製した疑似電源回路網 KIRI-LISN を用いて雑音端子電圧試験を行った。測定対象は AC-DC コンバータに接続した LED 照明とし、試験を実施した。前項で測定した電圧分圧係数を EMI 測定システム TEPTO-DV3 (テクノサイエンスジャパン社製) に設定し、協立テクノロジー社製の疑似電源回路網 (KNW-242C) と作製した疑似電源回路網 (KIRI-LISN) との測定結果を比較した。測定系を図7に測定結果を図8に示す。

図8より AC-DC コンバータと LED 照明の測定結果から、当センターの雑音端子電圧試験の結果と概ね同等のスペクトルを得られており、その差分は最大 5.34dB であった。CISPR16-1-2 に準拠している疑似電源回路網 KNW-242C との差はあるが、雑音端子電圧のスペクトルの傾向は捉えられており、作製した疑似電源回路網 (KIRI-LISN) でもノイズの傾向を捉え、認証試験前の事前測定で製品の能力を評価するには十分有能であると考えられる。

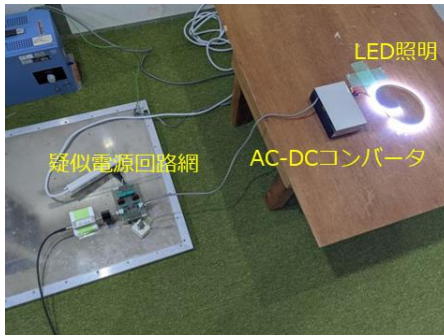


図7 雑音端子電圧試験の測定系

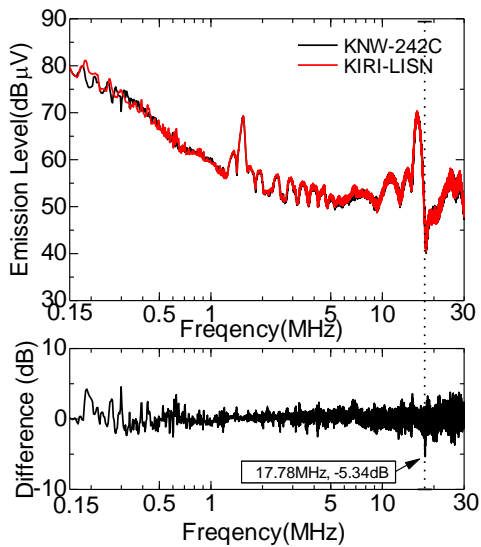


図8 雑音端子電圧試験の測定結果

### 3. 電磁環境推定モデル

#### 3.1 測定環境のモデル化

雑音端子電圧試験は、CISPRをはじめとした規格で試験配置が定められており、電波暗室またはシールドルームでの評価が必要である。一方、中小企業では、そのような設備は非常に高価で、測定の頻度を考えると費用対効果の面から導入は非常に難しい。

そこで、疑似電源回路網の特性並びに試験配置における特性をブラックボックス化し、1つのモデルとすることで、電波暗室などの設備がない環境において雑音端子電圧の測定ができることを検証した。本報告では、電波暗室と当センターの電子測定室で雑音端子電圧試験の比較を行った。

#### 3.2 開発現場での測定結果

雑音端子電圧試験の試験配置図及び測定結果を図9及び図10に示す。CISPRでは、雑音端子電圧試験には基準GND面が必要となる。一般的な実験室では、基準GND面がないことから、実験室のアースと基準GND面となるアルミ板を接続し、本実験系での基準

GND面とした。アルミ板の大きさの制約上、疑似電源回路網側とAC-DCコンバータ側で各一枚のアルミ板を使用した。それぞれ同じアースに接続しており、同電位である。本実験系では、一般の商用電源から疑似電源回路網を介してAC-DCコンバータへ電源供給を行っている。疑似電源回路網には一次側に1 $\mu$ Fと静電容量の大きいコンデンサを用いているため、通常より大きな漏れ電流が流れる。実験中の漏電遮断機の動作を防止するため、商用電源のコンセントと疑似電源回路網の間に絶縁トランスを介し、漏電遮断機が動作しないように対策した。その他、電波暗室での測定では高さ40cmのテーブルの上にAC-DCコンバータを配置したが、本実験系では高さ40cmの発砲スチロールの上に配置して実験を行った。図10に示す測定結果より、電波暗室と電子測定室の測定結果を比較すると1MHz以下の周波数では電子測定室の結果が低めに出ているものの、1.5MHz付近と15MHz付近のスペクトルはピークを捉えており、その他周波数のスペクトルの傾向も捉えている。また、作製した疑似電源回路網であるKIRI-LISNを用いた測定結果も同様の傾向を示しており、電波暗室でない実験室での測定においても認証試験前の事前測定で製品の実力を評価するには十分有能であると考えられる。

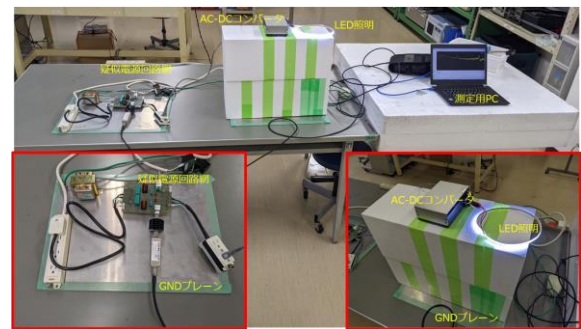


図9 試験配置図

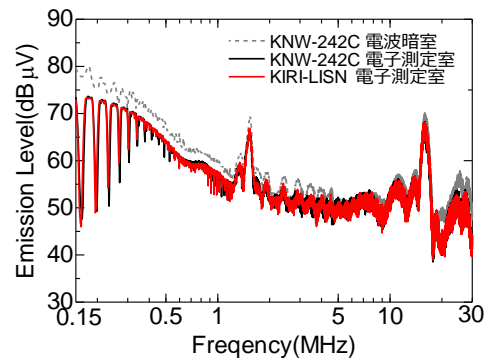


図10 電子測定室での雑音端子電圧試験

## 4. 試験用発振器の開発

### 4.1 方形波発振器の作製

雑音端子電圧試験の評価においては、被評価装置が雑音端子電圧試験の周波数帯で安定したノイズを発振できるものが望ましい。しかしながら、市販の一般電気製品では、そのようなものは流通しておらず、また試験研究用の装置は1台当たり数十万円と高価である。そこで、雑音端子電圧試験の評価向けに安定した周波数を発振できる方形波発振器の開発を行った。方形波発振器は比較的安価に作製できるシュミット・トリガ回路<sup>4)</sup>を用いて構成することとした。シュミット・トリガ回路は、入力にヒステリシスを持ち、ある閾値に対し2値化(Hi/Lo)する回路である。ヒステリシスを持つことにより、閾値付近の電圧であっても、過剰に反応することなく、波形のバタつきを抑えられる。また、方形波発振器とすることで、基本周波数の高調波を持つ波形を発振することができ、広帯域なスペクトルを出力することができる。本報告では、基本周波数を200kHzとし、シュミット・トリガ回路を用いた方形波発振器の開発を行った。

### 4.2 回路シミュレーション

まず、回路設計のためにアナログデバイス社のSpiceシミュレーションソフトウェアLTSpice<sup>5)</sup>を用いて回路シミュレーションを行った。シミュレーション回路を図11に示す。基本周波数 $f_{osc}$ の設計は、図11の抵抗R1とコンデンサC1の値で今回使用したICである74HC14を用いると下記の近似式で決定される。

$$f_{osc} \approx 1/CR \quad (\text{Hz}) \quad (1)$$

ここで、抵抗R1を10k $\Omega$ とし、コンデンサC1を0.5nFとすると、基本周波数 $f_{osc}$ は200kHzとなる。ICの駆動回路を4.5Vとした際に、出力電圧が100mVとなるように、出力側の抵抗を分圧した。図12にシミュレーション結果を示す。

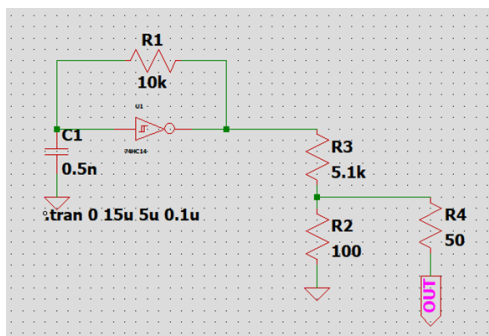


図11 方形波発振器のシミュレーション回路

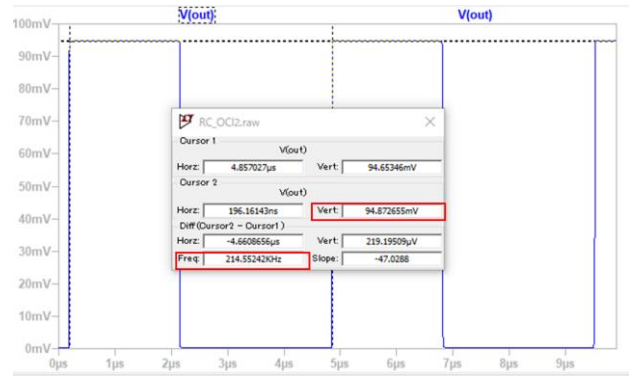


図12 シミュレーション結果

シミュレーション結果より、基本周波数 $f_{osc}$ は214.45kHz、出力電圧は94.8mVとなり、概ね設計通りであった。基本周波数が異なるのは、LTSpiceが提供しているICのモデル特性の差によるものだと考えている。

### 4.3 方形波発振器の評価

シミュレーションに方形波発振器としての性能が確認できたため、発振回路の試作を行った。試作した回路を図13に示し、オシロスコープを用いた実測結果を図14に示す。



図13 試作した方形波発振回路

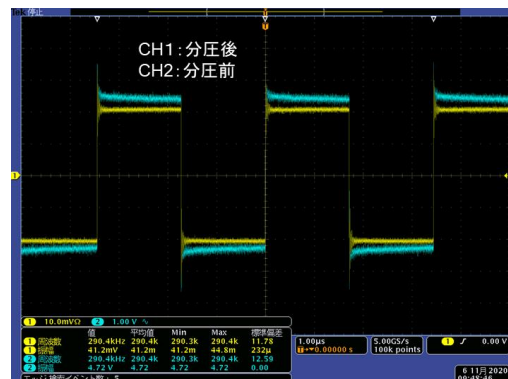


図14 方形波発振回路の実測結果

実測結果では、基本周波数が290kHz、出力電圧が42mVであった。設計値とはずれているが、方形波の発振ができており、疑似電源回路網の評価には問題ないことから、試作した方形波発振器を用いて疑似電源網の評価を行う。

#### 4.4 雑音端子電圧試験の評価

試作した方形波発振器を用いて雑音端子電圧試験を実施した。疑似電源回路網に直接方形波発振器の出力を印可するため、図15のような測定治具を作製し、雑音端子電圧試験を実施した。測定結果を図16に示す。測定結果より、基本波の周波数は284.33kHz、出力電圧は84.27dBuVであった。また方形波発振器の出力波形を印加していることから、奇数高調波に大きなスペクトルが30MHz付近まで発生していることも確認できている。広帯域にスペクトルを出力できていることから、雑音端子電圧試験の評価に十分利用できると思われる。



図15 測定治具

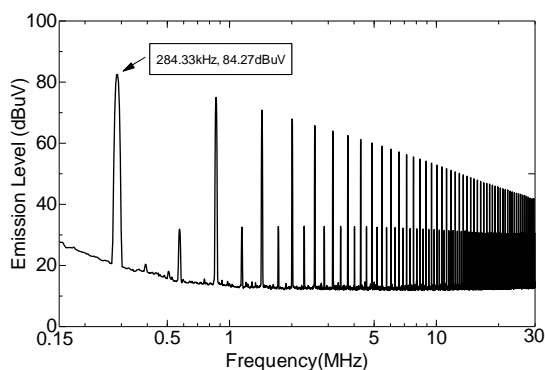


図16 雑音端子電圧試験による評価

### 5. おわりに

企業内で雑音端子電圧試験を実施できるようにするため、簡易的な疑似電源回路網の作製及びその評価方法について検証を行った。疑似電源回路網につ

いては、規格に準拠したものと比較すると数dBの差は生じたが、スペクトルの傾向は捉えられており、企業内での評価では十分利用できる可能性を示した。また、雑音端子電圧試験の評価用に方形波発振器を作製したことで、雑音端子電圧試験の点検に利用でき、日頃から発振器を用いて評価することで機器の故障等を予見することができ、信頼性のある測定環境を提供することができる。本研究の成果を企業の技術支援・技術指導につなげていく。

### 謝辞

本研究は、「九州地方知事会 EMC 研究会」並びに「西日本 EMC 研究会」からの協力・助言を得た成果を活用している。上記研究会に参加している岡山県、山口県、福岡県、大分県、宮崎県及び鹿児島県には深く御礼申し上げます。

なお、本研究は公益財団法人JKAの補助を受けて導入した機器（高周波計測システム）を用いた成果であり、深く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 情報通信審議会，“平成23年度情報通信審議会答申諮問第2号「国際無線障害特別委員会（C I S P R）の諸規格について」のうち「無線周波妨害波及びイミュニティ測定装置と測定法に関する規格 第2部 第1編 伝導妨害波の測定」”，総務省，平成23年9月16日，<https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/inter/cispr/hyousi/c16-2-1.pdf>，参照2019-07-01
- 2) 高木相．“EMI測定と測定サイトの特性評価法”．EMC原理と技術 製品設計とノイズ/EMCへの知見．第2版．科学情報出版株式会社，2016，pp. 287-289
- 3) 情報通信審議会，“情報通信審議会からの一部答申諮問第3号「国際無線障害特別委員会（C I S P R）の諸規格について」のうち「無線妨害波およびイミュニティ測定装置の技術的条件 第2編 補助装置 - 伝導妨害波」”，総務省，平成19年7月26日，<https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/inter/cispr/hyousi/mc16-1-2.pdf>，参照2019-07-01
- 4) 鈴木雅臣．“パワーMOSを使ったモーター駆動回路”．定本 続トランジスタ回路の設計．第24版．CQ出版，2017，pp. 228-248
- 5) 神崎康宏．電子回路シミュレータLTspice入門編．第3版．CQ出版，2010，255p



# エンドミルの微小切込み切削による表面改質

## Study on surface modification machined by micro end milling processes

川村浩二\*1, 坂本重彦\*2, 村井満\*1

Koji KAWAMURA, Shigehiko SAKAMOTO and Mitsuru MURAI

Key words : end milling, burnishing mechanism, surface integrity, stainless steel

### 1. はじめに

近年、急速な経済のグローバル化が進み、アジア諸国の新興国企業との価格競争により、日本の製造業を取り巻く環境は厳しさを増している。また、国内では生産年齢人口の減少や働き方改革への取組みから、企業には労働生産性の向上が強く求められている。この状況のなかで、中小企業の機械加工の生産現場では、工程集約やリードタイム短縮など工程改善に取り組んできた。しかし、市場からは更なるコスト削減、品質改善が要求されている。このため、難削材の部品加工など付加価値の高い製品への転換で、活路を見出す企業が増えている。その中でもステンレス鋼への需要は大きく、半導体製造装置部品、航空部品などに幅広く使用されている。

半導体製造装置に使用される精密部品の多くは、高い寸法精度が要求されるために切削加工で製作されるが、製造工程内で繰返しの温度変化や腐食の雰囲気など過酷な環境にさらされる。このため、切削加工後の製品は寸法、形状などの幾何学的性質の要求事項を満たすだけでは不十分で、加工面近傍の残留応力や材料組織など加工面品位 (Surface Integrity) の考慮が必要である<sup>1) 2)</sup>。もし、考慮内容が不足すれば、使用中の耐食性低下による腐食が発生し、半導体製造時の歩留り低下の原因になる。通常、このような要求を満たすには、切削加工で部品を作製後に、ショットピーニングや高周波焼入れによる表面改質が行われる<sup>3) - 5)</sup>。しかし、これらの方法は別の作業工程が必要で、生産効率が低下する。そこで注目を集めている加工法が、金属材料表面の塑性変形を利用して表面改質を行うバニシング加工である<sup>6) - 10)</sup>。

筆者らはエンドミルの微小切込み切削によるバニシング作用を活用し、マシニングセンタ上の加工工程のみで段取り替えなしに精密仕上げと表面改質を同時に行える新たな精密加工法であるエンドミルバニシング法 (EBM : end milling-burnishing method) を提案している<sup>11)</sup>。本研究では、ステンレス鋼 SUS316 の表面層に高い圧縮残留応力を有する高硬度の仕上げ面を実現するための実験的な検討を行った。また、SUS304 のデータと比較することで、硬さ上昇に影響を及ぼす要因を明らかにした。

### 2. 実験装置および実験方法

実験装置は3軸制御の立形マシニングセンタで、切削工具はねじれ角 43° の4枚刃超硬エンドミルを使用し、切削油剤は植物油ベースのセミドライ加工専用油剤を使用した。被削材は SUS316 と SUS304 で、脱炭および溶体化処理したもので、ビッカース硬さ試験方法 (JIS Z 2244:2009) で測定した母材の硬さは SUS316 が 159 HV, SUS304 が 163 HV であった。

実験装置および加工時の模式図を図 1 に示す。加工実験は切削現象を理解しやすくするため、エンドミルの底刃を使用せず被削材の下面より底刃を 1mm 突き出した側面切削とした。また、エンドミルの刃先形状が加工面品位に影響を及ぼすこともあるため<sup>12) - 15)</sup>、前加工条件で加工した4枚刃エンドミルの刃径のばらつきが 0.5 μm 以内で安定する切削距離 260 m の状態の工具を使用した。その時の状態を非接触三次元測定装置で測定したところ、底刃から 5 mm 上部の刃先丸み約 3.6 μm、逃げ面摩耗幅約 7.5 μm と計測された。

EBM の模式図を図 2 に示す。図 2(a)より、EBM は工具半径方向切込み量  $Rd = 5 \mu\text{m}$  の微小切込みで生じるバニシング作用を活用し、被削材表面の表面粗さ向上と同時に、表面改

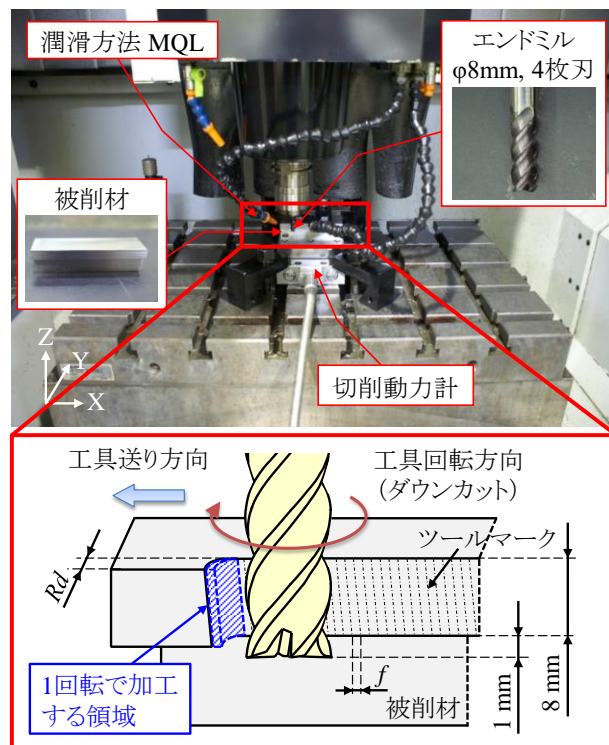
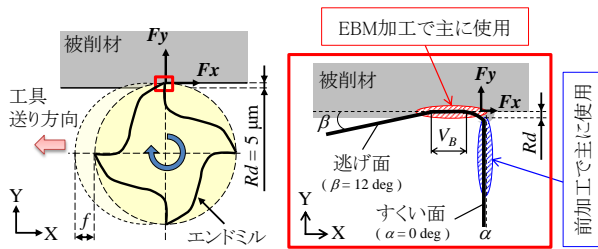


図 1 実験装置および加工時の模式図<sup>11)</sup>

\*1 熊本県産業技術センター: 〒862-0901 熊本県熊本市東区東町 3-11-38

\*2 金沢工業大学: 〒924-0838 石川県白山市八東穂3-1  
(学会受付日: 2022年 5月26日)





(a) 上面からの模式図 (b) 刃先の模式図

図2 エンドミルバニシング法(EBM)の模式図<sup>1)</sup>

表1 実験条件

マシニングセンタ	3軸立形マシニングセンタ	
切削工具	TiAlNコート超硬スクエアエンドミル 工具直径: $D = 8 \text{ mm}$ 刃数: 4 ねじれ角: $43^\circ$ 刃先丸み: $3.6 \mu\text{m}$ 逃げ面摩耗幅: $V_B = 7.5 \mu\text{m}$	
	被削材	SUS316, SUS304
	潤滑方法	MQL(植物性切削油)
	加工条件	前加工 切削速度: $V_c = 60 \text{ m/min}$ 1刃当たり送り量: $f = 50 \mu\text{m/tooth}$ 工具軸方向切込み量: $A_d = 8 \text{ mm}$ 工具半径方向切込み量: $R_d = 800 \mu\text{m}$
エンドミルバニシング法(EBM) EBM-A加工条件 $V_c = 60 \text{ m/min}, f = 50 \mu\text{m/tooth}$ EBM-B加工条件 $V_c = 20 \text{ m/min}, f = 50 \mu\text{m/tooth}$ EBM-C加工条件 $V_c = 20 \text{ m/min}, f = 2 \mu\text{m/tooth}$		

質層を生成するものである。EBM加工時の刃先の模式図を図2(b)に示す。加工実験に使用した工具の逃げ角は $12^\circ$ 、すくい角は $0^\circ$ であり、EBM加工時に主に使用する領域は赤い斜線で示した逃げ面と被削材表面が接触する部分である。実験条件を表1にまとめる。加工実験は工具メーカーの推奨条件を参考にした前加工後の加工面に対して、EBM加工を実施した。加工後の加工面の表面粗さは接触式表面粗さ測定機、硬さはビッカース硬さ試験機、残留応力はX線残留応力測定装置により測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 加工条件が表面粗さに及ぼす影響

本実験ではSUS316を被削材に、良好な平滑面を実現するため、EBM加工後の加工面の表面粗さを評価した。表面粗さと加工条件の関係を図3に示す。なお、前加工とEBM加工は同一工具を使用している。表面粗さ測定は、被削材中央部のZ軸方向8 mm幅の下端から1, 4, 7 mmの3カ所を測定し平均値を算出した。前加工後の加工面の表面粗さは $R_a 0.370 \mu\text{m}$ 、 $R_z 1.904 \mu\text{m}$ であった。前加工条件の工具半径方向切込み量のみ $R_d = 5 \mu\text{m}$ に小さくしたEBM-A加工後の加工面および切削速度も $V_c = 20 \text{ m/min}$ に小さくしたEBM-B加工後の加工面の表面粗さは、 $R_a, R_z$ ともに前加工面と同程度であった。

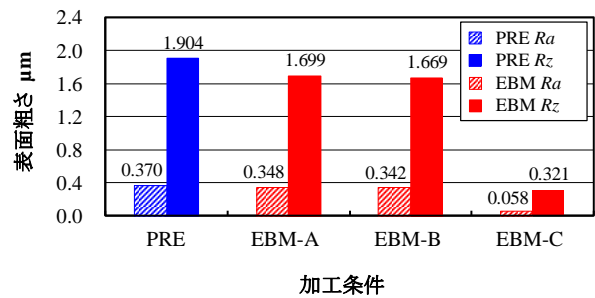
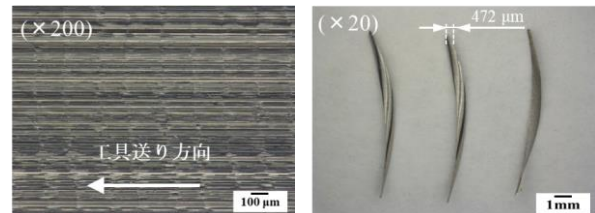
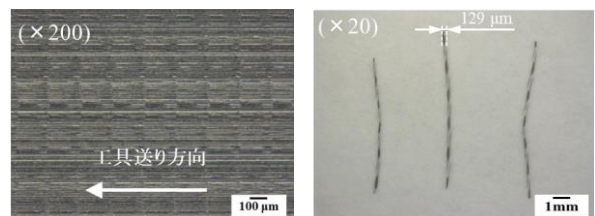


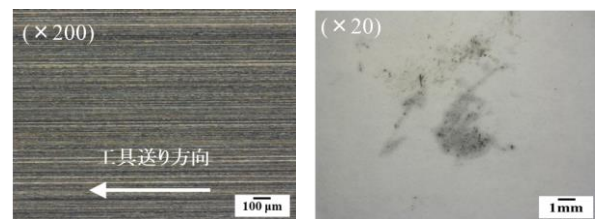
図3 SUS316 表面粗さと加工条件の関係



(a) 前加工後の加工面と切りくず



(b) EBM-A 加工後の加工面と切りくず



(c) EBM-C 加工後の加工面と切りくず

図4 SUS316 加工面と切りくずの光学顕微鏡写真

また、実験条件の中でもっとも小さく設定した切削速度 $V_c = 20 \text{ m/min}$ 、1刃当たりの送り量 $f = 2 \mu\text{m/tooth}$ のEBM-C加工後の加工面の表面粗さは、 $R_a 0.058 \mu\text{m}$ 、 $R_z 0.321 \mu\text{m}$ であった。これは、前加工後の加工面と比較すると $R_a$ および $R_z$ が1/4以下と良好な平滑面が得られた。

前加工、EBM-A加工およびEBM-C加工後の加工面と切りくずの光学顕微鏡写真を図4に示す。図4(a)より、前加工後の加工面はツールマークが残り、加工中に約 $472 \mu\text{m}$ の流れ形の切りくずが排出した。図4(b)より、EBM-A加工後の加工面にもツールマークが残り、加工中に約 $129 \mu\text{m}$ の流れ形の切りくずが排出した。図4(c)より、EBM-C加工後の加工面はツールマークが存在せず、加工中に微細な粉状の切りくずがエンドミルに付着した。図3および図4より、EBM-C加工後の加工面の表面粗さが良好になった要因は、1刃当たりの送り量を小さくしたことによる理論粗さの影響およびエンドミル刃先の逃げ面が被削材表面を押しならし、被削材表面が塑性変形することによるバニシング作用の影響で表面粗さが向上したものと考えられる。

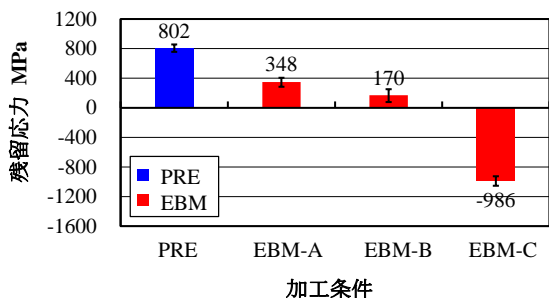


図5 SUS316 残留応力と加工条件の関係<sup>16)</sup>

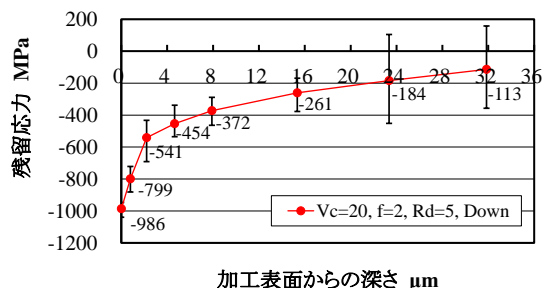
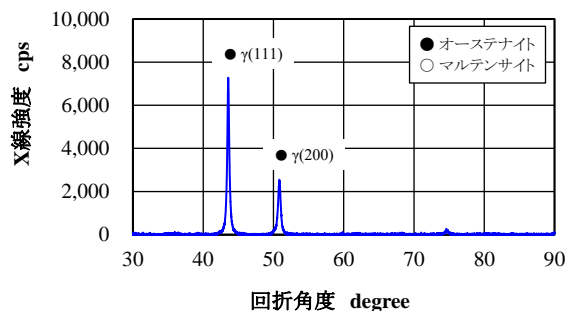


図6 SUS316 EBM-C 加工面の深さ方向の残留応力<sup>16)</sup>

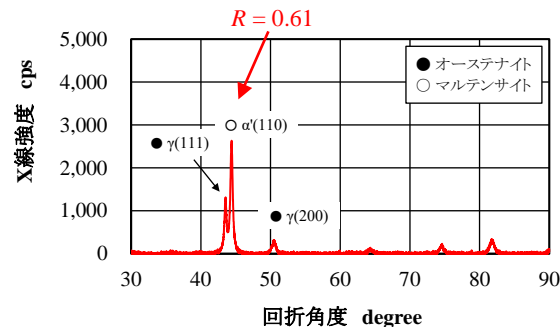
### 3.2 加工条件が残留応力に及ぼす影響

加工工程で生じた残留応力は、製品の形状精度や疲労強度に大きな影響を及ぼす。加工後の加工面の残留応力の符号(引張, 圧縮), 大きさおよび深さ分布を評価するため,  $\cos\alpha$  法による X 線応力測定を行った。測定は被削材の Z 軸方向 8 mm 幅の中央部 6 カ所で行い, 平均値を算出した。残留応力と加工条件の関係を図 5 に示す。前加工後の加工面の残留応力は 802 MPa であり, 大きな引張残留応力が生じている。EBM-A, EBM-B および EBM-C 加工後の加工面の残留応力は, 348 MPa, 170 Pa, -986 MPa であった。この結果より, EBM 加工を行うと圧縮方向の残留応力が付与できることがわかった。また, EBM-C 加工後の加工面は, 通常の切削加工では生成することができない高い圧縮残留応力を有する表面になった。この要因は, エンドミル刃先の逃げ面が被削材表面に複数回当たり, 表面は押し潰されることで引き伸ばされるが, 被削材内部は拘束されて変形ができず, 内部に圧縮応力が発生したためと推測される。さらに, 被削材表面の金属結晶組織がオーステナイト相からマルテンサイト相へ相変態する時に体積膨張するため, 材料内部でも不均一な状態になり, 高い圧縮残留応力が生成したと推測される。

加工後の加工面の深さ方向の残留応力を評価するため, EBM-C 加工後の加工面に電解研磨装置で直径 5 mm の円孔部を所定の深さに研磨した後, X 線応力測定を行った。EBM-C 加工面の深さ方向の残留応力を図 6 に示す。加工表面からの深さ 0.8  $\mu\text{m}$  および 2.2  $\mu\text{m}$  の残留応力は, -799 MPa, -541 MPa で高い圧縮残留応力を有していた。さらに深くなると, 徐々に圧縮残留応力が減少し, 深さ 23.4  $\mu\text{m}$  の位置の残留応力は -184 MPa であった。ただし, この時の測定データの誤差範囲は著しく大きくなっており, EBM 加工後の加工表面層に生成する結晶粒が微細化した加工変質層ではなく, 結晶粒径が大きい母材の領域になっていたと考えられる。した



(a) EBM-A 加工後の加工面の X 線回折パターン



(b) EBM-C 加工後の加工面の X 線回折パターン

図7 SUS316 加工条件別の X 線回折パターン<sup>16)</sup>

がって, EBM-C 加工条件で生成する加工変質層の深さは, 16  $\mu\text{m}$  以上 24  $\mu\text{m}$  未満である。

### 3.3 加工条件がマルテンサイト比率に及ぼす影響

加工条件別の X 線回折パターンを図 7 に示す。X 線回折試験は  $\text{CuK}\text{-}\alpha$  線による  $2\theta/\theta$  測定を行い, 回折ピークがもっとも高い 45° 近傍におけるオーステナイトのピーク  $\gamma(111)$  とマルテンサイトのピーク  $\alpha'(110)$  を比較することで評価した。図 7(a) より, 前加工後の加工面の結晶構造はオーステナイト相のみ存在した。図 7(b) より, EBM-C 加工後の加工面の結晶構造はオーステナイト相とマルテンサイト相が存在した。つまり, 加工条件によりマルテンサイト相が誘起することがわかった。

加工後の加工面の結晶構造を定量的に評価する目的で, オーステナイト相とマルテンサイト相の比率を求めた。45° 近傍のそれぞれの回折ピークに Voigt 関数をフィッティングし, マルテンサイト比率を  $R = \alpha'(110) / [\alpha'(110) + \gamma(111)]$  と定義することで評価した。図 7(b) の EBM-C 加工後の加工面の場合, マルテンサイト比率  $R = 0.61$  となりマルテンサイト相の占める割合がオーステナイト相より多くなった。

### 3.4 加工条件が表面硬さに及ぼす影響

加工後の加工表面の硬さを評価するため, ビッカース硬さ試験を実施した。試験は試験荷重 0.1 N, 荷重保持時間 10 秒で行い, 被削材の Z 軸方向 8 mm 幅の中央部 10 カ所を測定して平均値を算出した。ビッカース硬さと加工条件の関係を図 8 に示す。前加工後の加工面の硬さは 279 HV であった。EBM-A, EBM-B および EBM-C 加工後の加工面の硬さは, 355 HV, 371 HV, 488 HV であった。この結果より, EBM 加工後の加工面は 350 HV 以上の高硬度な加工面が得られることがわかった。EBM-A および EBM-B 加工後の加工面の硬さより, 切削速度が 60 m/min から 20 m/min に低下した場合, エ

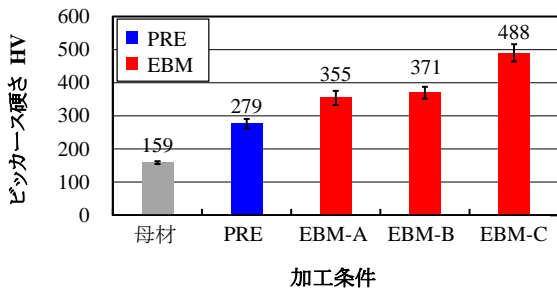


図 8 SUS316 ビッカース硬さと加工条件の関係<sup>16)</sup>

エンドミル刃先の逃げ面と被削材表面の接触時間が計算上 0.2 ms から 0.6 ms に増加することから、より切削力を被削材表面に伝達したために硬さが 355 HV から 371 HV に上昇したと考えられる。また、本実験条件の中でもっとも切削速度と 1 刃当たりの送り量が小さい EBM-C の加工条件では、母材の硬さ 159 HV と比較して 3 倍以上の 488 HV まで硬さが上昇することがわかった。これは 1 刃当たりの送り量を小さくすると、エンドミル刃先の逃げ面と被削材表面が同一面で複数回接触し、被削材の塑性変形による結晶格子内の転位密度が高まって著しく硬さが上昇したと考えられる。

### 3. 5 硬さの上昇に影響を及ぼす要因の考察

硬さが上昇した要因を調査するため、SUS304 を被削材に本実験と同一方法で EBM-C 加工後の加工面のビッカース硬さ試験と X 線応力測定を行った。SUS304 のビッカース硬さと加工条件の関係を図 9 に示す。SUS304 の前加工後の加工面の硬さは 276 HV であった。EBM-A、EBM-B および EBM-C 加工後の加工面の硬さは、354 HV、374 HV、492 HV であった。SUS304 と SUS316 の硬さを比較すると、双方の各加工条件で大きな違いは見られず、同程度の表面硬さを示した。次に、SUS304 の EBM-C 加工後の加工面の X 線回折パターンを図 10 に示す。図より、結晶構造は SUS316 と同様にオーステナイト相とマルテンサイト相が存在し、マルテンサイト比率は  $R = 0.72$  であった。

以上の結果から、EBM-C 加工後の加工面は SUS304 と SUS316 で表面硬さは大きく変わらないが、マルテンサイト比率が大きく異なることがわかった。硬さ上昇の要因は、加工硬化(結晶格子内の転位密度の増大)とマルテンサイト相へ相変態する際の体積膨張の影響が考えられるが、本加工方法では前者の加工硬化の影響が支配的であった。

## 4. 結言

本研究では、ステンレス鋼 SUS316 と SUS304 を被削材に、エンドミルパニシング法の加工条件が加工面品位に及ぼす影響を実験的に調査し、以下の結論を得た。

- (1) SUS316 の切削速度  $V_c = 20$  m/min, 1 刃当たりの送り量  $f = 2$   $\mu\text{m}$  / tooth の加工条件において、986 MPa の高い圧縮残留応力を有する加工面が得られる。また、加工変質層の深さは、16  $\mu\text{m}$  以上 24  $\mu\text{m}$  未満である。
- (2) パニシング加工による硬さ上昇の要因は、マルテンサイト相へ相変態する際の体積膨張の影響より加工硬化の影響が支配的である。

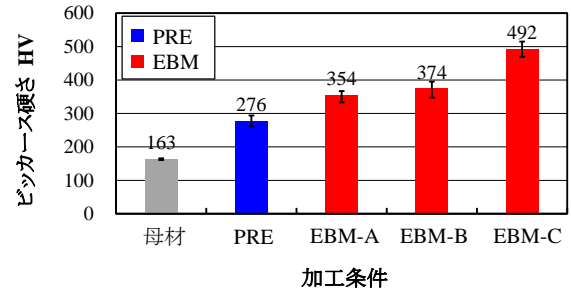


図 9 SUS304 ビッカース硬さと加工条件の関係<sup>17)</sup>

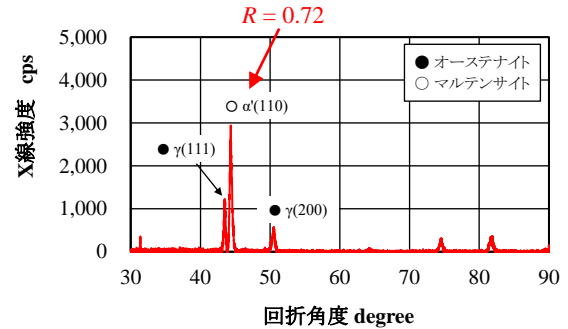


図 10 SUS304 EBM-C 加工後の加工面の X 線回折パターン<sup>17)</sup>

## 謝辞

本研究で使用した機器は、公益財団法人 JKA の補助を受けて整備したものであり、ここに記して深く御礼申し上げます。

## 5. 参考文献

- 1) 高沢孝哉: Surface Integrity, 精密工学会誌, 55, 10 (1989) 1772.
- 2) 吉田喜太郎: Surface Integrity に関する研究の現状, 砥粒加工学会誌, 36, 3 (1992) 132.
- 3) 原田泰典: ショットピーニング, 表面技術, 67, 1 (2016) 2.
- 4) 当舎勝次: ピーニング技術の最新動向, 砥粒加工学会誌, 65, 2 (2021) 66.
- 5) 藤木栄: 高周波焼入れの事例, 機械設計, 61, 6 (2017) 24.
- 6) 岡島英昭: センタレス・ローラパニシング法の研究(第 1 報), 精密工学会誌, 65, 4 (1999) 610.
- 7) 大橋正英: ローラパニシング加工, ツールエンジニア, 58, 9 (2017) 42.
- 8) 笹原弘之, 矢田智彦, 富永啓介, 木内智: 炭素鋼 S45C への摩擦攪拌形パニシング加工による硬化組織の創成, 日本機械学会論文集 C 編, 78, 787 (2012) 996.
- 9) 田中隆太郎, 岡田将人, 中川智博, 古本達明, 細川晃, 上田隆司: 複合機械加工による高品位面性状を有する表面改質層の生成, 日本機械学会論文集 C 編, 78, 794, (2012) 276.
- 10) 岡田将人, 吉野裕大, 新川真人, 柳嘉代子, 佐々木敏彦: 工具回転型パニシング加工による樹脂射出成形用アルミニウム合金型上の機上仕上げ, 日本機械学会論文集, 87, 896, (2021) 21.
- 11) 川村浩二, 坂本重彦, 岩本竜一: ステンレス鋼のエンドミルパニシング法における加工条件が加工面品位に及ぼす影響, 砥粒加工学会誌, 61, 9 (2017) 488.
- 12) 近藤英二, 皮籠石紀雄, 向井原崇, 引地力男: 丸みのある切れ刃に作用する切削抵抗, 日本機械学会誌, C 編, 66, 651 (2000) 236.
- 13) 引地力男, 近藤英二, 皮籠石紀雄, 新井実: 切削加工における加工硬化層の生成機構, 日本機械学会誌, C 編, 68, 67 (2002) 2175.
- 14) 池田雄一郎, 森田昇, 山田茂, 高野登, 大山達雄, 堀功: 微小切込みにおける 2 次元切削現象に関する研究, 砥粒加工学会誌, 53, 9 (2009) 560.
- 15) 津枝正介, 長谷川嘉雄, 中野哲夫: 刃先の微小丸味が切削現象に及ぼす影響(第 1 報, 刃先の押しならし作用), 日本機械学会論文集, 26, 166 (1960) 803.
- 16) 川村浩二: ステンレス鋼 SUS316 の加工面品位に及ぼすパニシング加工の影響, 2020 年度砥粒加工学会学術講演会論文集, (2020) 213.
- 17) 川村浩二: エンドミルの微小切込み切削によるステンレス鋼の表面改質に関する研究, Ph.D.thesis, Kumamoto University, (2017).



編集委員会

委員長	森山 芳生
委員	松尾 英信
	渡辺 秀典
	黒田 修平
	池田 朋弘
	野口 サララ
	吉田 恭平
	齋田 佳菜子
	川口 真里奈

---

熊本県産業技術センター研究報告 第57号 令和3年度

編集・発行 熊本県産業技術センター

〒862-0901 熊本市東区東町 3-11-38

TEL: 096-368-2101 (代表)

FAX: 096-369-1938

---

発 行 者：熊本県  
所 属：熊本県産業技術センター  
発行年度：令和4年度