

熊本県工業技術センター

研 究 報 告

第34号 平成7年度

REPORTS OF
KUMAMOTO INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE
No. 34 1996

平成8年11月

熊本県工業技術センター

〒862 熊本市東町3-11-38

Published by

Kumamoto Industrial Research Institute

3-11-38, Higashi-machi, Kumamoto-shi 862 Japan

熊本県工業技術センター研究報告

第34号 (平成7年度) 平成8年11月

目 次

〔報 文〕

ネットワーク型の製品開発デザインシステムの構築 -コンピュータ技術利用による工業デザインシステムの統合化研究-	原口隆一	1
YAGレーザーによるセラミックスの微細穴加工 (第1報) -超精密・微細加工技術に関する研究-	高橋孝誠 上村 誠 八戸和男 金丸賢治 永井 茂	5
旋削部品の検査管理システムの構築	井戸泰男 城戸浩一 森山芳生	11
衝撃圧を受ける円板の変形機構に及ぼす衝撃圧分布の条件と拘束条件の影響	石水泰夫 藤田昌大 持原 稔 芋阪浩男 井山裕文	15
射出原料の熱的特性と成形条件最適化方法 -新素材粉末の射出成形法-	上村 誠 木村幹男 河野敏謙 中川博文	20
品質管理のためのBASIC プログラム「品質管理オタスケ君」の開発	冨重定三	26
データ・ロガーの電磁波ノイズとその防止対策技術 -電磁ノイズ環境における電子機器の性能向上に関する研究-	上田直行 北村智行 松原和哉	32

高温型木材乾燥機のための自動乾燥制御システムに関する研究	城戸浩一	42
	中村哲男	
	園田増雄	
Ti(C,N)微粉体の低温焼結		
—スマートストラクチャーセラミックスに関する研究(第3報)—	永田正典	46
	本田悠紀雄	
	末永知子	
	上田直行	
高温高圧水を用いた繊維強化プラスチックの分解・再利用技術に関する研究		
—廃棄プラスチックの再利用に関する研究—	永岡昭二	50
	永山賛平	
	上村 誠	
	上野勝彦	
	菅田 孟	
	中根 堯	
反応性スパッタリング法によるAlN薄膜の圧電特性		
—応力検知能力を有する構造用セラミックス材料に関する研究(第5報)—	上田直行	54
	本田悠紀雄	
	末永知子	
	永田正典	

REPORTS OF
KUMAMOTO INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE

No. 34 (1995.4-1996.3) Nov. 1996

CONTENTS

(Original Papers)

Construction of a Design System for Product Development Using NETWORK —Study on Industrial Design Systems integrated by Computer Technology— Ryuichi HARAGUCHI	1
Machining of Micro Holes in Ceramics Using YAG Laser (1st Report) —Study on Ultra-Precision and Micro Machining— Kosei TAKAHASHI, Makoto UEMURA, Kazuo YAE, Kenji KANEMARU and Sigeru NAGAI	5
Construction of a Measuring and Management System for Lathing Parts Yasuo IDO, Koichi KIDO and Yoshio MORIYAMA	11
Effects of Pressure Distribution and Boundary Condition on Deformation Mechanism of a Circular Plate Subjected to Shock Pressure Yasuo ISHIGORI, Masahiro FUJITA, Minoru MOCHIHARA, Hiroo OSAKA and Hirofumi IYAMA	15
Thermal Characteristics of Raw Materials and Optimization of Conditions in Injection Molding —Injection Molding of New Material Powders— Makoto UEMURA, Mikio KIMURA, Toshinori KAWANO and Hirofumi NAKAGAWA	20
Development of a BASIC Program for Statistical Quality Control Sadami TOMISIGE	26
Electromagnetic Wave Noise from Data Loggers and Technology for Prevention of Electromagnetic Interference —Study on Improvement of Electronic Equipment Performance under Electromagnetic Noise— Naoyuki UEDA, Tomoyuki KITAMURA and Kazuya MATUBARA	32
Study on an Automatic Drying Control System for the High-Temperature-Type Wood Drier Koichi KIDO, Tetsuo NAKAMURA and Masuo SONODA	42

Low-Temperature Sintering of Ti(C,N) Fine Powder

—Study on Smart Structure Ceramics (3rd Report)—

..... Masanori NAGATA, Yukio HONDA, Tomoko SUENAGA and Naoyuki UEDA 46

Decomposition of Fiber Reinforced Plastics Using High-Temperature High-Pressure Water

—Recycling Technology for Waste Plastics Polymer—

Shoji NAGAOKA, Sanpei NAGAYAMA, Makoto UEMURA, Katuhiko UENO, Tsutomu SUGETA

..... and Takashi NAKANE 50

Piezoelectric Characteristics of AlN Thin Film Deposited Using Reactive Sputtering Method

—Study on Stress-Responsive Ceramics for Application to Frame Material(5th Report)—

..... Naoyuki UEDA, Yukio HONDA, Tomoko SUENAGA and Masanori NAGATA 54

ネットワーク型の製品開発デザインシステムの構築

— コンピュータ技術利用による工業デザインシステムの統合化研究 —

原口隆一*

Construction of a Design System for Product Development Using by Network

— Study on Industrial Design Systems Integrated by Computer Technology —

Ryuichi HARAGUCHI*

地方産業の基盤は中小企業にあるが、ここ数年中小企業を取り巻く環境は悪化している。このような状況の中で、県内中小企業は技術レベルで着実に力をつけてきており、下請け、受注生産、素材生産などの体制から、自社製品の開発、生産を志向する動きが見えてきている。しかし、中小企業では、自社製品開発の経験や製品開発技術力がほとんどなく、今後どのように体系的な製品開発技術の確立を行うかが重要な課題と言える。中小企業では、できる限り最小の投資で、かつ比較的短期間で、しかも効率的、効果的な製品開発システムが必要であり、しかも市場は常に高いレベルのデザインを要求している。そこで、中小企業間、デザイナーで構成するコラボレーションでの製品開発を行う、組織的、効率的な方法と考えられるネットワーク型の製品開発デザインシステムの構築を行った。このネットワーク型の製品開発デザインシステムにおいて共有される製品開発デザインプロセスを大きく6段階に分類し、中分類として4段階、細分類として5段階の合計120の作業内容を想定した。これにより、デザインプロセスデータをデジタル化し、通信技術を活用したコラボレーションでの製品開発環境が可能になった。今後は、具体的製品開発事例を進めながら、デザインプロセスデータを蓄積を図りデザインプロセスのデータベースを構築する。

1. はじめに

地方産業の基盤は中小企業にある。中小企業はそのほとんどが、大企業の下請け生産、受注生産、素材生産を中心に他律的な発展をしてきた。しかし、ここ数年、円高、海外への生産拠点の移動など、中小企業を取り巻く環境は悪化している。

このような状況の中で、県内中小企業は技術レベルで着実に力をつけてきており、下請け、受注生産、素材生産などの体制から、自社製品の開発、生産を志向する動きが見えてきている。

自社製品生産は、製品の高付加価値化、企業イメージの向上、他律的な企業から自律的な企業への移行など、企業の活性化へつながる。これは、企業を生産出荷額の規模でなく、幅広い基準で企業を評価することになる。

自社製品生産は、今後地方産業の在り方を考えるとともに、県内中小企業が早急に取り組むべき新しい課題である。中小企業の主要課題は、技術開発から製品開発の時代へシフトしていると言える。

しかし、中小企業では、自社製品開発の経験や開発技術力がほとんどなく、今後どのように自社での製品開発技術の確立を行うかが重要な課題と言える。

本報告では、中小企業に製品開発技術確立のための、

* 情報デザイン部

ネットワーク型の製品開発デザインシステムの構築と運用について検討を行ったのでその内容について報告する。

2. 製品開発技術

製品開発技術は、自動車や家電メーカーの大企業が数十年かけて、多数のスタッフと投資をして築き上げてきた企業秘密に属する占有技術であり、中小企業が取り組むには大きな技術格差がある。

現状において、中小企業が新製品を開発するにはつぎの問題点がある。

- 1) 開発の経験、実績がほとんど存在しない。
- 2) 製品開発を形や色のデザインのレベルの問題と考えている。
- 3) 先行投資が必要で、投資に対する収益性の予測が困難である。
- 4) 製品開発には経費と時間がかかる。
- 5) 技術は真似できるが、デザインは真似できない。

そこで、中小企業が大企業と同様な製品開発システムに取り組むことは不可能で、独自の製品開発デザインシステムが求められる。

製品開発技術は、技術研究型開発と製品デザイン研究型開発とが考えられる。技術研究型開発は開発サイクルが1年あるいは数年の時間を必要とし、経費も多くかかる大企業方式であり、中小企業で実施するには不可能である。一方製品デザイン研究型開発は、既存技術の導入

や活用による新技術で、自社の特長を最大限活用する比較的短期間で開発できることから中小企業向きである。

しかし、デザイン研究型開発にしても、中小企業には、その技術的蓄積はほぼゼロで、大企業と同じデザイン力を確立するには時間と投資が必要である。外注することで目先の製品デザインを得るのではなく、長期的に社内に

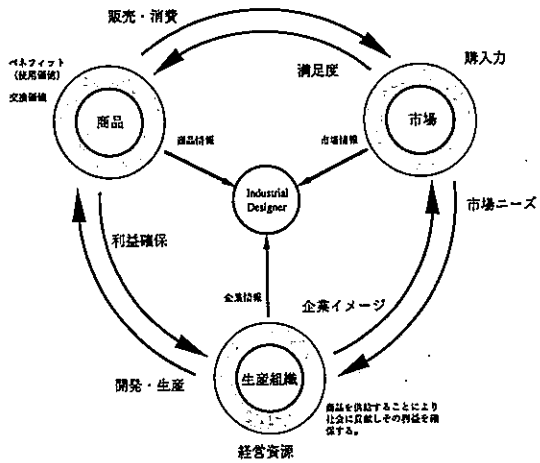


図1 製品開発基本構造図

製品開発システムを構築することが必要である。理想的には、社内に複数のスタッフからなるデザイン組織をつくる必要があるが、中小企業が数名のデザイン組織をはじめから組織するにはあまりに開発投資が大きく、

またリスクも高くなる。最小の投資とリスクを低くする製品開発デザインシステムの段階的導入を図ることが重要である。

まず、基本的な製品開発の構造について図1に示す。

企業にとっての製品開発は、生産組織、市場、製品の視点から「ものの情報の流れ」に整合性があるように、製品を企画、設計、生産、販売の計画を立案することである。つまり、情報の流れからは、収集した情報から、新しい情報を創造し、情報を製品に変換し、製品を情報に変換する作業といえる。

また企業が製品開発を行うためには必要な条件として

- 1) 企業の製品開発戦略
- 2) 開発スタッフ（社長、工場長、営業部門など）
- 3) 製品開発デザインシステム
- 4) 開発マネージャー

以上の4つの存在が必要である。

3. ネットワーク型の製品開発デザインシステムの構築

中小企業の開発は、できる限り最小の投資で、かつ比較的短期間で、しかも効率的、効果的な開発システムが必要であり、しかも市場は常に高いレベルのデザインを要求している。

そこで、中小企業とデザイナーで構成するネットワー

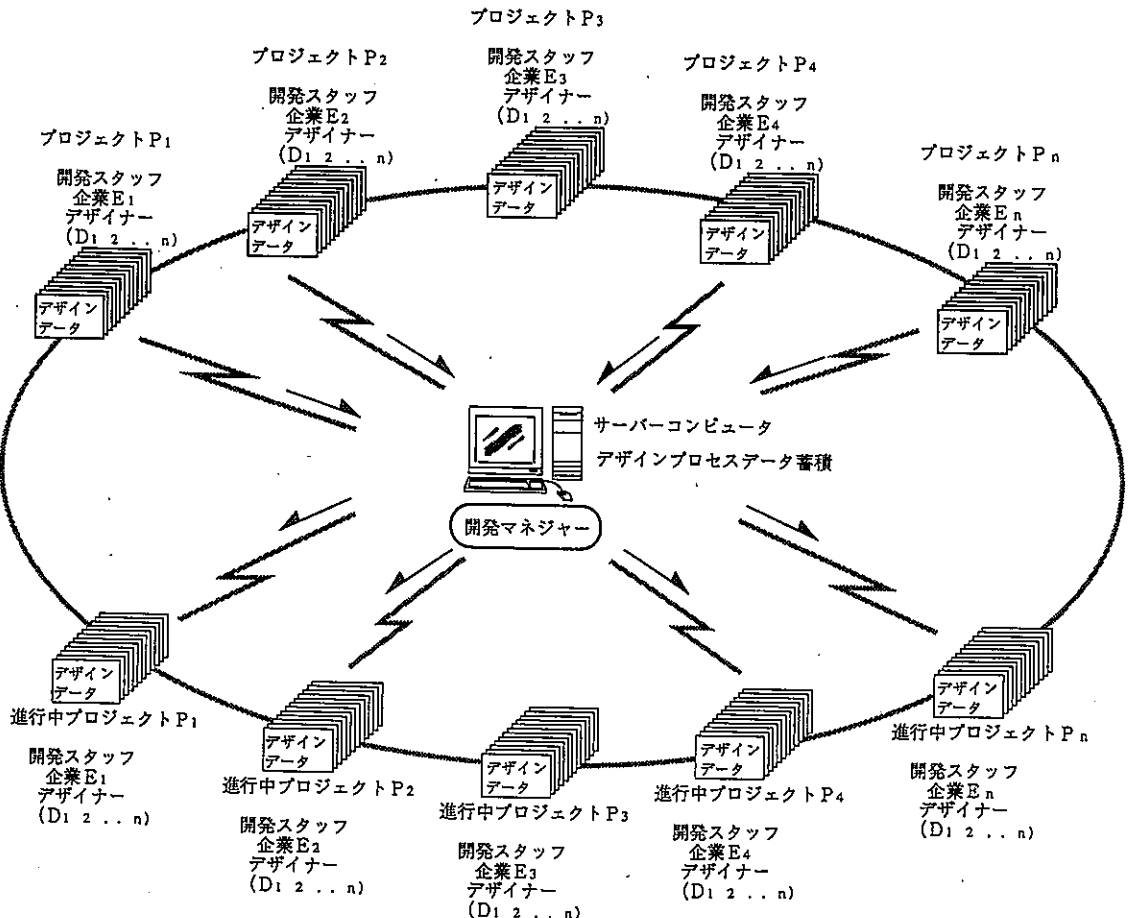


図2 ネットワーク型の製品開発デザインシステムの概念図

ク型の製品開発デザインシステムの構築を行った。(図2) このシステムは、企業とデザイナーで開発スタッフを編成し、各プロジェクトが各デザインプロセスデータを作成し、そのデータを共有することにより、コラボレーションでの製品開発を行う組織的、効率的な方法である。

まず、このネットワーク型の製品開発デザインシステムを運用するには、

- 1) 信頼関係、共通認識をもち、グループウェアが可能なチーム体制がもてること
- 2) 共有されるデザインプロセスをもつこと
- 3) 各段階のデザインプロセスの様式を統一すること
- 4) デザインデータがリージョンナルデータベース化されること。
- 5) データ支援のハード及びソフト環境の確保ができること。

以上により、デザインプロセスのデータの共有化を図りながら、各々独立した製品開発のためのデザインプロジェクトを効率的に進行する。

4. デザインプロセスの設計と様式

デザインを決定するまでのプロセスがデザインプロセスであり、デザインの完成度はデザインプロセスに依存するともいえる。どのようなプロセスでデザインが決定されるのか、企業やデザイン事務所では、独自のシス

表1 製品開発アウトラインプロセス

製品開発段階	製品開発大分類	製品開発中分類の番号と概要
製品開発第1段階	D1 開発計画	D1-01 開発課題 D1-02 現状ヒアリング D1-03 開発テーマ形成 D1-04 開発戦略立案
製品開発第2段階	D2 製品企画	D2-01 デザイン情報収集 D2-02 デザイン構造化 D2-03 企画のためのアイデア出し D2-04 製品企画書作成
製品開発第3段階	D3 製品デザイン	D3-01 製品デザインのアイデア探索 D3-02 製品アイデア出し D3-03 プレゼンテーション D3-04 製品デザインアイデア決定
製品開発第4段階	D4 生産計画	D4-01 テスト生産 D4-02 テスト販売 D4-03 実証設計 D4-04 実証生産
製品開発第5段階	D5 販売計画	D5-01 市場導入計画 D5-02 販売責任計画 D5-03 パッケージデザイン D5-04 販促計画
製品開発第6段階	D6 製品評価	D6-01 市場製品評価 D6-02 リデザイン D6-03 次期開発計画 D6-04 理論書後

テムを完成させており、通常企業秘密として公開されない。デザインの結果を知ることにはできるが、その経過であるプロセスを知ることにはできない。中小企業が製品開発技術を確立することは、このデザインプロセスを確立することである。特にコラボレーションによるデザイン

表2 開発計画プロセス

D1-01	開発課題
D1-0101	概要ヒアリング
D1-0102	質問交換、ディスカッション
D1-0103	問題点の抽出と整理
D1-0104	問題解決のための検討
D1-0105	今後どうすべきかアウトライン検討
D1-02	現状ヒアリング
D1-0201	企業概要
D1-0202	生産技術、生産工程、生産設備
D1-0203	対象製品調査
D1-0204	ユーザー分析
D1-0205	販売分析
D1-03	開発テーマ形成
D1-0301	開発テーマに関するアイデア出し
D1-0302	開発の問題点の抽出と整理
D1-0303	開発の問題点解決のためのアイデア出し
D1-0304	開発テーマの形成
D1-0305	開発テーマの検証
D1-04	開発戦略立案
D1-0401	開発目的、目標、手段(方法)の明確化
D1-0402	行動を実行するための目的、目標、手段、根拠の立案
D1-0403	短期中期長期製品開発計画
D1-0404	対象市場の明確化
D1-0405	プロジェクトチーム体制確立

表3 製品企画プロセス

D2-01	デザイン情報収集
D2-0101	製品先行イメージスケッチ作成
D2-0102	製品に関する情報作成、製品機能分析
D2-0103	ユーザーに関する情報収集と分析作業
D2-0104	企業に関する情報収集と分析作業
D2-0105	デザイン調査、実証調査
D2-02	デザイン構造化
D2-0201	観察法(長所、短所、希望点列挙)
D2-0202	設問法(5W1H)による対象製品分析
D2-0203	問題点のリストアップ、問題点の整理と分析
D2-0204	問題点解決のアイデア出し
D2-0205	デザイン構造化による分析
D2-03	企画のためのアイデア出し
D2-0301	デザインと条件(制約条件)のリストアップ
D2-0302	製品企画テーマのアイデア出し
D2-0303	ブレインストーミング
D2-0304	観察法による製品イメージ作成
D2-0305	設問法による製品イメージ作成
D2-04	製品企画書作成
D2-0401	製品、ユーザー、技術によるデザイナーチェック検討
D2-0402	デザインコンセプトのアイデア出し
D2-0403	デザインコンセプトアイデア検討決定
D2-0404	商品イメージ立案
D2-0405	デザイン予条件の整理

表4 製品デザインプロセス

D3-01	製品デザインのアイデア探索
D3-0101	先行イメージスケッチ(何でも出しておく)
D3-0102	ブレインストーミングによるアイデア出し
D3-0103	アイデア探索手法によるアイデア出し
D3-0104	シミュレーション分析
D3-0105	ユーザー反応チェック
D3-02	製品アイデア出し
D3-0201	アイデアスケッチ、ラフ図面、ラフモデル
D3-0202	アイデア検討会議(比較検討、評価、修正)
D3-0203	アイデアスケッチ、ラフ図面、ラフモデル
D3-0204	アイデア検討会議(比較検討、評価、修正)
D3-0205	アイデアのしほり込み
D3-03	プレゼンテーション
D3-0301	デザイン図面、完成予想図、モデル作成
D3-0302	プレゼンテーション手法の検討
D3-0303	プレゼンテーション資料の作成
D3-0304	プレゼンテーション
D3-0305	プレゼンテーション内容評価検討
D3-04	製品デザインアイデア決定
D3-0401	アイデア評価会議
D3-0402	リデザイン、リデザイン図面、モデル
D3-0403	制作図面、詳細図面
D3-0404	試作、モデル作成
D3-0405	商品化デザインの決定

ワークは、全体を統合化するデザインプロセスが最重要課題といえる。

またデザインプロセスを確立することは、デザインを技術としての体系化することであり、デザインの効率化、デザインの質の均一化、リスクの軽減、経費の節減などのデザインワークにおいて生産性の大幅な向上が期待される。

そこで、ネットワーク型の開発デザインシステム構築には共通化されたハード環境と同時に、ソフト環境であるオープンなデザインプロセスの設計を行った。

具体的事例を進めながら、基本的な原案として、まず、製品開発全体アウトラインプロセスを表1に、デザイン決定までの細分類の作業項目を開発第1段階である開発計画を表2に、開発第2段階である製品企画を表3に、開発第3段階である製品デザインを表4に示した。製品開発段階大分類、中分類、細分類に整理し、各プロセスをデータベースソフトを利用しデータの蓄積を図る。

5. まとめ

ネットワーク型の製品開発デザインシステム構築のためのデザインプロセスの設計を行った結果、共有されるデザインプロセスは大分類として6段階に、中分類としてさらに4段階、細分類としてさらに5段階の合計120の作業内容が想定されることがわかった。たとえば各作業内容を半日としても、最低60日の日数を要することになる。

この共有されるデザインプロセスに基づいて、いくつかの具体的製品開発事例デザインプロジェクトを進めながら、デザインプロセスデータの蓄積を図る。この作業により、デザインプロセスデータがどのように製品デザインに活用されているか、デザインの結果とデザインプロセスの関係を検討し、さらにデザインプロセスの完成度を高めていく。

そして、デザインプロセスデータはすべてデジタル化することにより、データの通信が可能となり、コラボレーション対応のネットワーク型製品開発デザインシステムが運営され、デザインプロセスのデータベースが構築される。

YAGレーザによるセラミックスの微細穴加工 (第1報)

-超精密・微細加工技術に関する研究-

高橋孝誠*・上村誠*・八戸和男**・金丸賢治***・永井茂****

Machining of Micro Holes in Ceramics Using YAG Lazer(1st Report)

-Study on Ultra-Precision and Micro Machining-

Kousei TAKAHASHI*, Makoto UEMURA*, Kazuo YAE**, Kenji KANEMARU** and Sigeru NAGAI**

本研究では、構造用各種セラミックスに微細穴を加工する目的で、パルス発振方式のYAGレーザを使用して、1パルス照射によるパルス幅、レーザ出力、パルス周波数を変化させた場合の穴加工可能範囲、加工穴寸法との関係、形状の観察等を行った。

その結果、1パルス照射の加工可能範囲は、パルス幅が0.5~20msの範囲で板厚1.0mmで0.03J、0.5mmでは0.01Jの出力で加工ができた。また、レーザ出力と加工穴径はほぼ比例関係になり、レーザ出力が増加すると加工に費やされるエネルギーが大きくなるため、被加工表面の溶融が大きくなり穴径が増加する傾向を示した。出力が一定の場合は、パルス幅が大きくなるとピークエネルギーが低くなるため、穴径は小さくなる傾向を示した。

各材料の比較では、窒化ケイ素、アルミナ、ジルコニアの順で穴径は小さくなった。また、製造方法のCPとHIPでは、CPの方が、大きな穴径になる傾向を示した。

1. はじめに

レーザ光は材料加工、計測、分析、医療、芸術等の分野で幅広くかつ有効に利用されている。特に材料加工の分野では各種のレーザ光を用いて半導体製造、金属加工、あるいはセラミックスの加工などに適用が広がり、レーザでなければ不可能といわれる分野も次第に広がっている。

特にインクジェットプリンターのノズルや各種のフィルター、ガラスやセラミックス基盤の穴や溝加工等、ますます精密・微細加工の要求が高まってきている。

加工に用いられるレーザ光としては、YAG、CO₂、エキシマが主流となっているが、この中でYAGレーザは発振形態が多様で、発振効率が高く、光電送に柔軟性があるなど多くの利点があり、また出力を安定して絞れるということから、精密・微細加工に適していると言える¹⁾。

そこで今回は微細穴加工の応用技術の確立を図ることを目的として、YAGレーザ加工機を用いて、近年使用範囲が広がりつつある各種のセラミックスを被加工材として、レーザ出力やパルス幅を種々に変化させて微細穴加工を行い、加工穴の寸法測定や形状観察を行って、加工特性の検討を行った。

2. 実験方法

本研究に用いたYAGレーザは、住友重機械工業(株)製のJK702Hで、レーザの出力はWELDER(標準共振器)、L

* 生産技術部
** 九州東海大学工学部
*** (現 ミクロ技研(株))
**** (現 三島自動車(株))

D2、LD1の3種類設定が可能で、平均出力パワーがそれぞれ350w、135w、75wとなっている。今回の実験では出力を安定して絞れるという理由から、ビームの拡がり角を通常の10分の1程度に落としたLD1仕様を用い実験を行った。

被加工材は、代表的な構造用セラミックスの3種類を用いた。それぞれの種類は、アルミナ(Al₂O₃)の常圧焼結材(以下CP材と略す)及び熱間静水圧焼結材(以下HIP材と略す)、ジルコニア(ZrO₂)のCP材及びHIP材、窒化ケイ素(Si₃N₄)のHIP材であり、板厚は0.5mmと1.0mmの2種類とした。加工表面は研削仕上げとしたが、アルミナのHIP材については、加工表面の比較のためラッピング仕上げを加えた。それぞれの物性を表1に示す。

表1 実験に用いた材料の特性

材質	名称	製造所	密度 kgf/cm ³	抗折力 kgf/mm ²	硬度 HRA	熱膨張係数 ×10 ⁻⁶ /°C	熱伝導率 cal/cm·s·°C
Al ₂ O ₃ (CP)	AH-100S	岩尾磁気	3.97	45	92.8	7.1	
~(HIP)	Al ₂ O ₃	日本フジヤ	3.97	75	93.6	7.0	0.07
ZrO ₂ (CP)	Z-95	岩尾磁気	6.05	177	91.0	9.2	
~(HIP)	ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	日本フジヤ	6.10	150	91.5	9.2	0.008
Si ₃ N ₄ (HIP)	Si ₃ N ₄ -Y ₂ O ₃	~	3.25	120	92.8	3.2	0.056

実験は、レーザ光をセラミックス板の板厚方向に、原則的に1パルス照射することにより1回の穴加工とした。また、穴径の測定は貫通穴の直径ではなく、レーザ照射表面の溶融部の直径をもって穴径とした。表面溶融部の測定は、マイクロスコブ((株)ウイルソン)の1000倍のレンズを使用した。

レーザエネルギーの決定は、まずパルス幅を決め、次に設定するパルスエネルギー値になるようにパルス周波

数を決定した。パルス幅は0.5~20ms、パルス周波数は0.2~200Hz、パルスエネルギーは0.01~30Jの範囲でそれぞれのパラメータを変化させた。

加工条件は、アシストガスに空気(圧力:5kgf/cm²)を使用し、レーザー焦点は加工材の表面とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 レーザ出力と加工穴径の関係

図1、図2にアルミナ(Al₂O₃)の板厚0.5mm、1.0mm (CP材及びHIP材) についての出力と加工穴径の関係を示す。

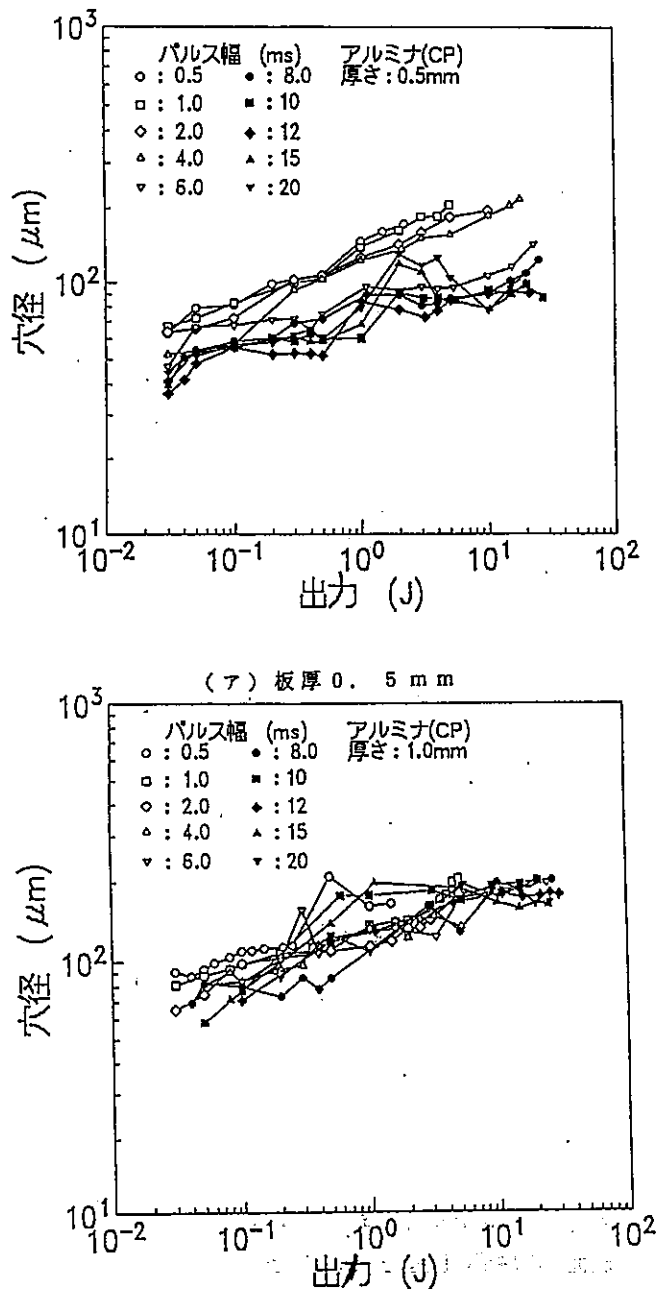
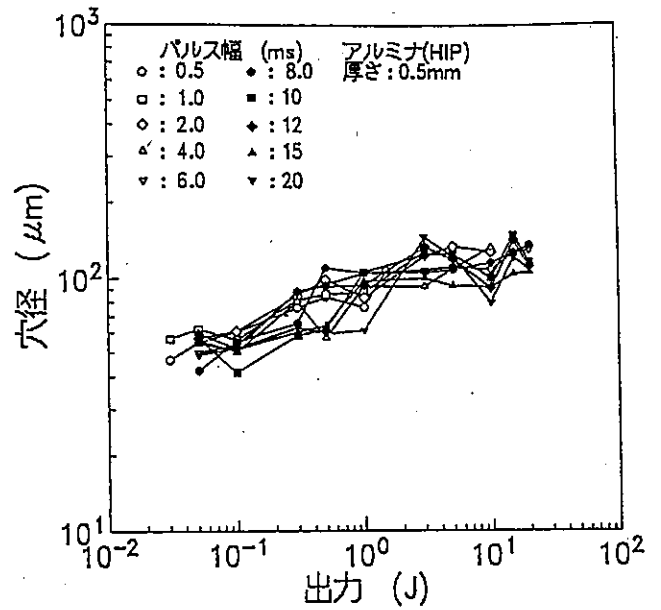
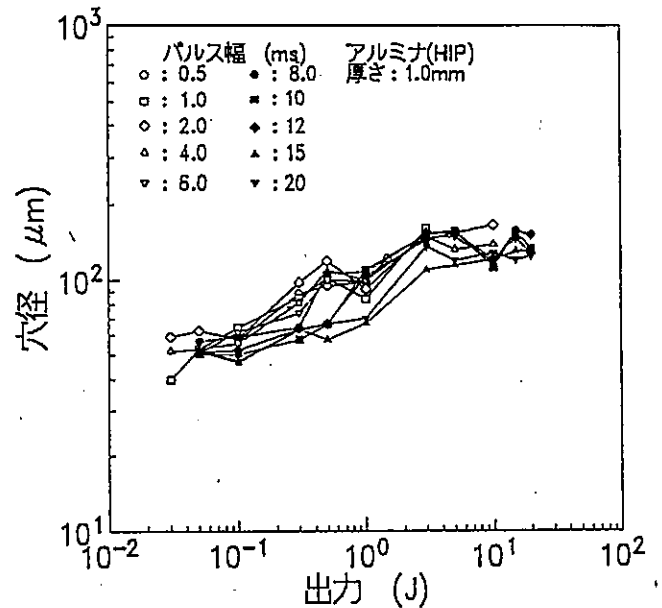


図1 出力と加工穴径との関係 (Al₂O₃-CP)



(ア) 板厚 0.5 mm



(イ) 板厚 1.0 mm

図2 出力と加工穴径との関係 (Al₂O₃-HIP)

パルス幅は0.5~20msの範囲で10種類に変化させ実験を行った。

1パルス照射による貫通穴の加工出力は、パルス幅によって多少の相違はあるが0.02~0.03Jである。また、最小の加工穴径は、板厚0.5mmでは、CP:35μm、HIP:40μm、板厚1.0mmでは、CP:60μm、HIP:45μm程度である。

いずれの図からも、出力の増加に伴って穴径も大きくなる傾向を示している。これは、レーザー出力が増加すると加工に消費されるエネルギーが大きくなるため、被加工材表面の溶融により表面の穴径が大きくなると思われる。

また、CP、HIP材のどちらも板厚1.0mmより0.5mmの方

が穴径が小さくなる傾向を示している。これは、板厚が薄いと貫通までの受光時間が短いので、熱拡散が少なくなるためと思われる。

焼結方法の違いで見るとCP材よりHIP材の方が全体的に穴径が小さくなる傾向を示す。これは、同一エネルギーにおいては、CP材の方が気孔が多いため溶融部が大きくなると思われる。

図3にHIP材の1.0mmについて、表面をラッピングした

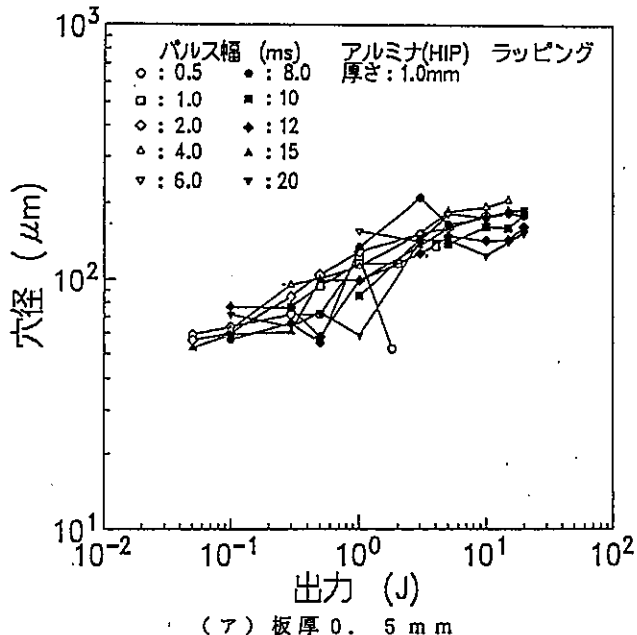


図3 出力と加工穴径との関係 (Al₂O₃-ラッピング)

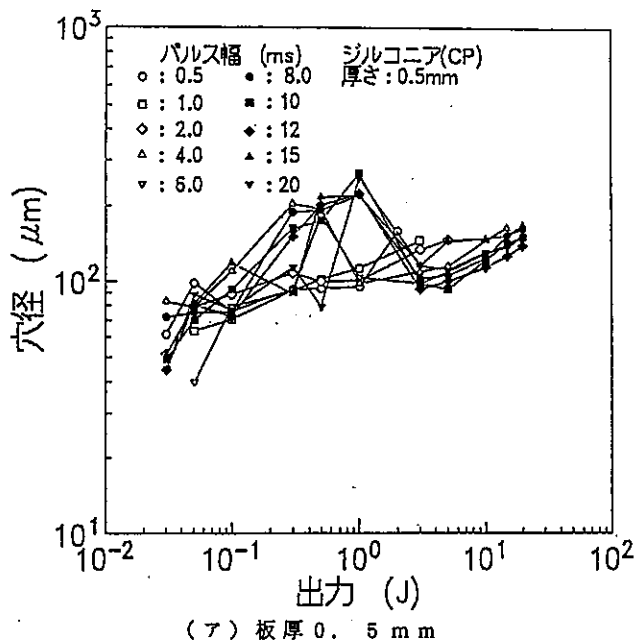
材料の出力と加工穴径の関係を示す。図2の(イ)と比較すると、ややラッピング面の方が研削面より穴径が大きくなっている。レーザーも一種の波長を持った光線であるので、当然、被加工物の材質や表面の粗さによって吸収状態が変化してくる²⁾。これについては、パルス幅との関係で述べる。

図4、図5にジルコニア(ZrO₂)の板厚0.5mm、1.0mm (CP材及びHIP材) についての出力と加工穴径の関係を示す。

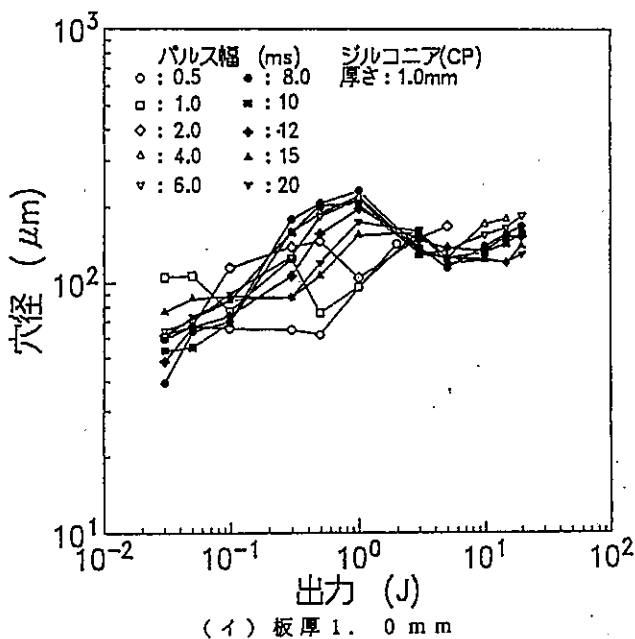
貫通穴の加工出力は、アルミナと同様に0.02~0.03Jである。最小の加工穴径は、板厚0.5mmでは、CP、HIP:40 μm、板厚1.0mmでは、CP:40 μm、HIP:50 μm程度であり、アルミナとほぼ同様の値を示している。また、出力が大きくなると穴径も大きくなる傾向が見られるが、パルス幅が8.0ms以上では、1.0J付近の穴径が大きくなっている。これは、ジルコニアの場合は、パルス幅が大きく照射時間が長くなることによって、レーザーエネルギーによる表面の溶融が起り、穴径が大きくなったものと思われる。アルミナも同様な溶融が起きるが、ジルコニアと比較すると少ない傾向を示す。

1.0J以上になると、パルス幅が大きくても貫通時間が短いので、表面の穴径は出力に比例して大きくなる。

焼結方法の違いでは、明確な差異は見られない。



(ア) 板厚 0.5 mm



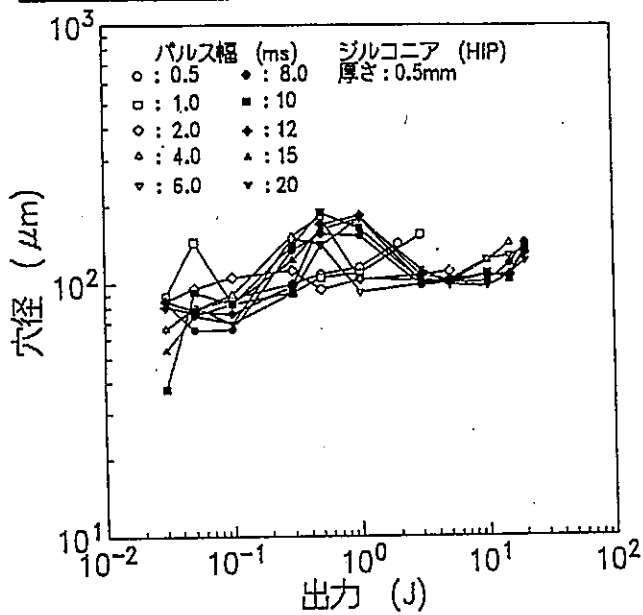
(イ) 板厚 1.0 mm

図4 出力と加工穴径との関係 (ZrO₂-CP)

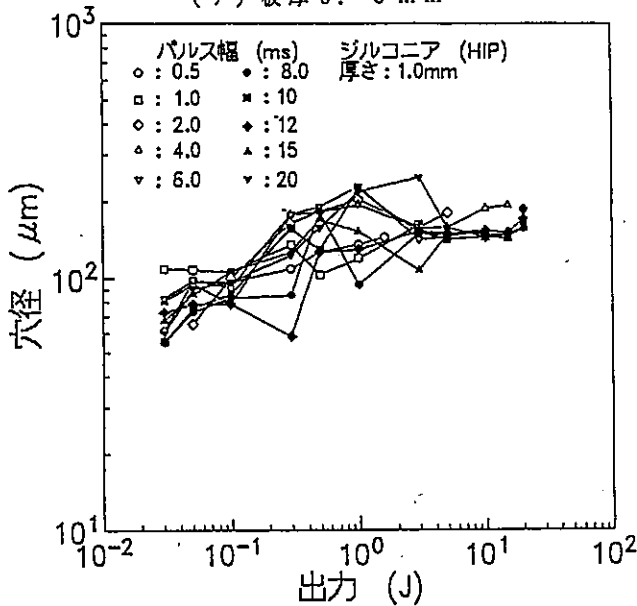
図6に窒化ケイ素(Si₃N₄)の板厚0.5mm(HIP材)についての出力と加工穴径の関係を示す。

最小の穴径は、30 μmと使用した材料の中では一番小さい穴径となった。窒化ケイ素の場合も出力が大きくなると穴径も大きくなる傾向を示すが、その傾向は直線的になっている。

貫通穴の加工出力は、0.04Jと少し高くなっている。これは、昇華分解材料であるため、アルミナやジルコニアと比較すると分解温度は低いが、熱伝導率が非常に大きいので、投入熱量が同じであっても熱の拡散が大きく、ビーム照射点温度上昇が抑えられるため貫通により高いエネルギーを必要とするためと考えられる²⁾。加工穴径も昇華分解を行うので、穴回りの溶融が少なく小さくなったものと思われる。



(ア) 板厚 0.5 mm



(イ) 板厚 1.0 mm

図5 出力と加工穴径との関係 (ZrO₂-HIP)

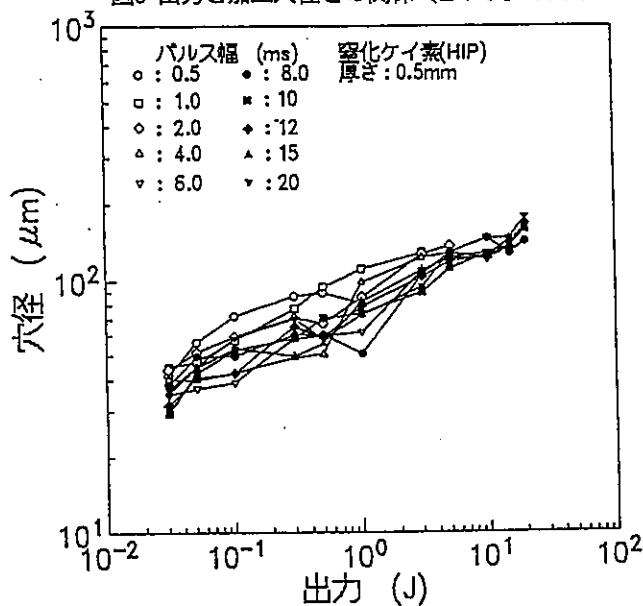


図6 出力と加工穴径との関係 (Si₃N₄-HIP)

3.2 パルス幅と加工穴径の関係

図1及び図2のアルミナ(Al₂O₃)の板厚0.5mm、1.0mm (CP及びHIP材) についてパルス幅の影響をみると、いずれの板厚においてもパルス幅と穴径との間あまり強い相関は見られないが、強いていえばパルス幅の増加に伴って穴径は小さくなる傾向を示している。

ここで、エネルギーをE(J)、平均のピークパワーをV(KW)、パルス幅をW(ms)とすれば、

$$E=V \cdot W$$

の関係があり、加工はいずれも1パルス照射の加工であるので、出力が同じ場合は加工に費やされるエネルギーは一定であるが、パルス幅が大きいとピークパワーが小さくなるため、結果的に穴径が小さくなったものと思われる。

焼結方法の違いでは、明確な差は現れていないがCP材の方が気孔が多く強度が弱い穴径がわずかに大きくなる傾向を示した。

図2及び図3のジルコニアについては、明確な差はみられなかった。

図7にアルミナの板厚1.0mm(HIP材)について、研削面

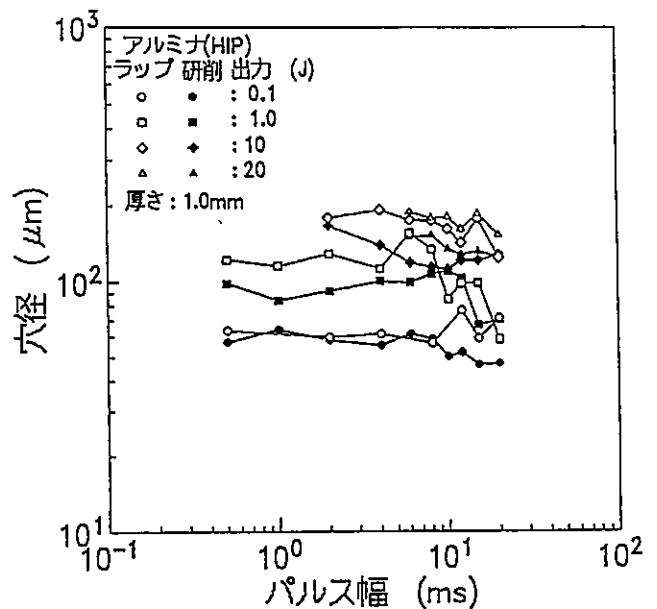


図7 パルス幅と加工穴径との関係 (Al₂O₃-HIP)

とラッピング面に対し穴加工を行った場合のパルス幅と加工穴径の関係を示す。それぞれの表面粗さは、研削面はRa=0.14μm、ラッピング面はRa=0.03μmである。

図からラッピング面がわずかに研削面より穴径が大きくなっている。3.1項で述べたように、レーザーは被加工物の材質や表面粗さによって吸収率が変化してくる。³⁾ ラッピング面は鏡面状態であるため、レーザー光が表面で反射を起こし定格出力が吸収されないため、表面が大きく溶融したものが再凝固して見かけの穴径が大きくなったものと考えられる。レーザー光のスポット径は数μmに

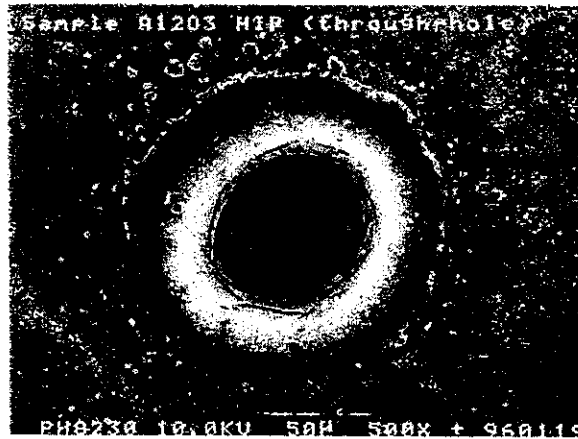
集光されるので、表面の微細な形状が加工に影響を及ぼすと予測される。これについては、今後、表面状態を数種類の粗さに設定し、粗さと表面反射の関係について実験を行い解明していきたい。

3.3 加工穴の表面性状

図8にアルミナ(CP、HIP)の出力1J付近で加工した加工



(ア) Al_2O_3 (CP)



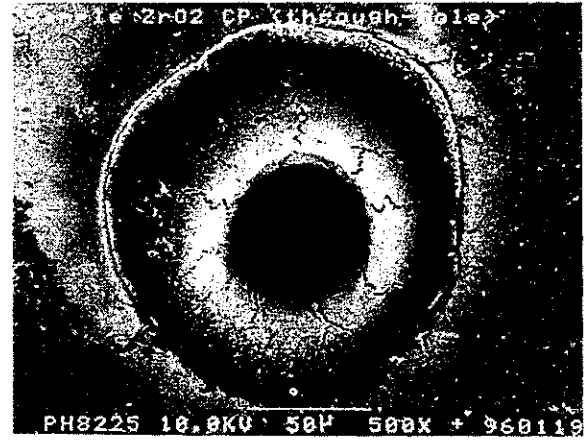
(イ) Al_2O_3 (HIP)

図8 加工穴形状 (Al_2O_3)

穴形状の例を示す。照射部が熔融し、周辺に凝固している様子がわかる。CP材(ア)では1方向に片寄った凝固が見られるが、これはアシストガスとして使用したエア-の方向性によるものと思われる。HIP材(イ)の方は均一な熔融である。これを、三次元SEMで断面を測定した結果、表面の溶着の高さはおよそ、CP材で11 μ m、HIP材で4 μ mとなっていた。

穴の真円度については熔融部が再凝固していることもあり、正確にはとらえにくい。

図9にジルコニア(CP、HIP)の加工穴形状の例を示す。アルミナ同様に熔融再凝固が起こっているが、アルミナよりやや大きな形状を示している。また、再凝固による



(ア) ZrO_2 (CP)



(イ) ZrO_2 (HIP)

図9 加工穴形状 (ZrO_2)

収縮で起こったと考えられる円周方向に沿った亀裂が、数本観察される。CP材とHIP材の相違はあまりない。

これを、同様に三次元SEMで断面を測定した結果、表面の溶着高さは、CP材で10 μ m、HIP材で8 μ mとアルミナの数値に近い。

レーザー加工の場合、瞬間的に熱エネルギーが照射されると同時に、アシストガスで急激な冷却が行われるため、熔融型のセラミックスでは、内部亀裂等が発生する恐れがある。そのため切断面等では二次加工が必要になってくる場合があるが、穴加工ではそのままで使用される例が多いので、今後これらの影響については検討していきたい。

4. おわりに

パルス発振のYAGレーザーを使用して、各種のセラミックスの穴加工を行った結果、以下の結果を得た。

- 1パルス照射によって貫通穴加工が可能な出力は、焦点を表面にした場合アルミナ、ジルコニアの板厚0.5~1.0mmで0.02~0.03J、窒化ケイ素の板厚0.5mmで0.0

- 4J)であった。
- 2) 表面の穴径は、熔融形のアルミナ、ジルコニアでは、板厚0.5mmで40 μ m、昇華分解形の窒化ケイ素では、板厚0.5mmで30 μ mであった。
 - 3) レーザ出力が増加すると加工に費やされるエネルギーが大きくなるため、加工材表面の熔融が大きく、穴径が大きくなる。
 - 4) 加工材の板厚は、薄いと貫通までの受光時間が短く、熱拡散が少なくなるため穴径が小さくなるものと思われる。
 - 5) 加工出力が一定であれば、パルス幅を変化させても1パルスで出力されるエネルギー量は変化しないので穴径に大きな変化はない。しかし、パルス幅が大きくなるとピークパワーが減少するため、表面の熔融が小さく穴径は小さくなる傾向を示す。
 - 6) 焼結方法の違いでは、明確な差は現れていないがCP材の方が気孔が多く強度が弱いため穴径はわずかに大きくなる傾向を示した。

7) アルミナのHIP材でラッピング面と研削面について穴加工を行った場合、表面の反射による影響で穴径はラッピング面が小さくなる傾向を示す。

本実験の加工穴表面性状の観察については、(株)エリオニクス社の3次元SEMでの測定をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- 1) 最新レーザー加工技術総編集委員会. “最新レーザー加工技術総覧” 東京, 産業技術サービスセンター, 1994. 42p.
- 2) 最新レーザー加工技術総編集委員会. “最新レーザー加工技術総覧” 東京, 産業技術サービスセンター, 1994. 88p.
- 3) 最新レーザー加工技術総編集委員会. “最新レーザー加工技術総覧” 東京, 産業技術サービスセンター, 1994. 42p.

旋削部品の検査管理システムの構築

井戸泰男*・城戸浩一**・森山芳生*

Construction of a Measuring and Management System for Lathing Parts

Yasuo IDO*, Koichi KIDO** and Yoshio MORIYAMA*

旋削加工において、加工自体はNC機が導入され自動化・省力化が進んでいるが、それに比べ合否判定あるいは品質管理のための測定は自動化が遅れており、そのため加工全体としては工数が増えているケースが多い。

このような状況のため、企業が生産性を上げるためには、検査工程の自動化、省力化を推し進めることが重要なポイントとなる。そこで本研究では旋削部品を対象に取りあげ、部品を測定マガジンにセットするだけで、1個ずつ部品が供給され、測定、検査、格納、品質管理データの採取を、一連の流れのなかで処理できるシステムを構築した。

当システムのハード構成は制御部、部品供給部、測定検査部、選別、良品格納部、データ処理部からなっており、制御はシーケンサ、測定にはレーザラインゲージ、データ処理にはパソコンを使用した。

1. 緒言

最近の県内の機械工場は、NC機械等の導入で自動化・省力化が進み、加工にはほとんど人手のかからない状況になってきている。しかし合否判定、品質管理のための寸法測定、データ処理には多くの人手を要し、このことが加工全般の工数を押し上げている一因となっている。

本研究では旋削部品を取りあげ、加工から流れてきた部品を順次測定し、合否の判別を行い不良品は排除し、合格品は定数毎に格納すると同時に、測定値は逐次パソコンに取り込み、一定ロット毎に統計処理を行い、品質管理データとして保存するシステムを構築した。

2. システム構成

2.1 システムの概要

図1にシステム概要を、図2にその写真を示す。

システムの構成要素は以下のとおりである。

(1) ワーク供給装置

ワーク供給装置はワークを一定量保有するワークプールマガジンと、ワークを1個ずつ測定部に供給するワーク切り出し装置からなる。ワーク切り出し装置概要は、図3のとおりで切り出し駒の動作には、エアシリンダーを用いた。

(2) ワークガイド

ワークガイドはワークを測定部、不良品排出装置及び良品格納マガジンまで導くためのガイドで、若干の傾斜がついており重力によりワークは、一定速度で流れている。

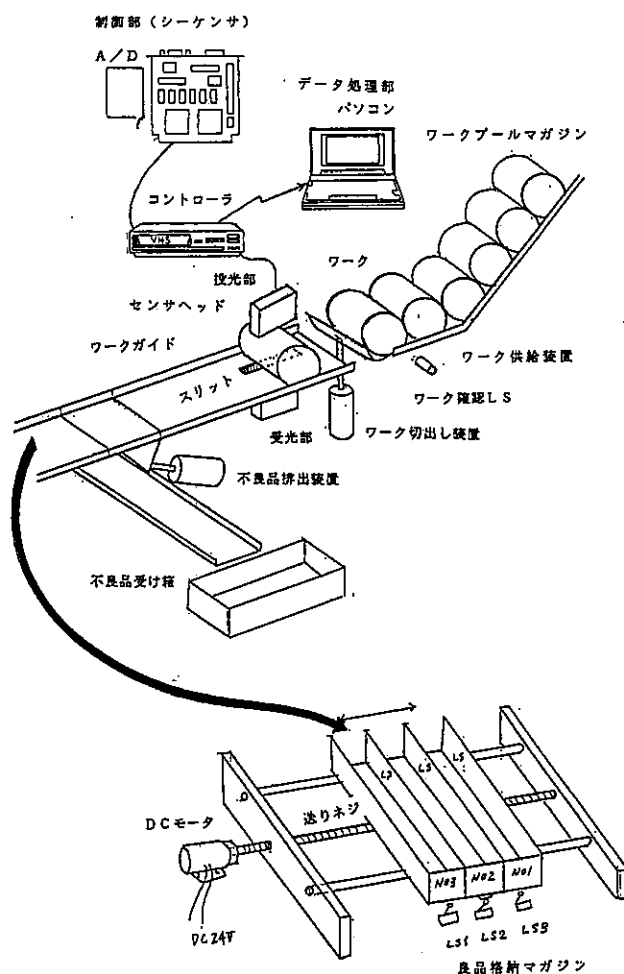


図1 旋削部品検査管理システム概要

* 生産技術部

** 電子部

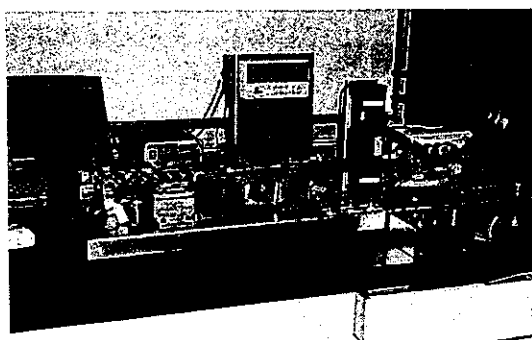
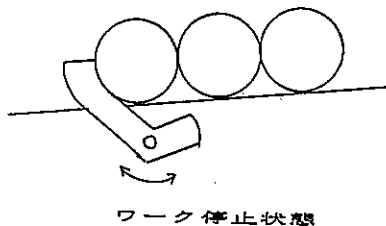
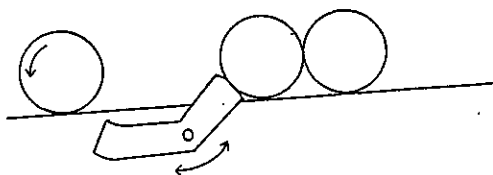


図2 システム全景



ワーク停止状態



ワーク1個切り出し状態

図3 ワーク切り出し装置概要

く。傾斜は無段階で調節可能で、流れの速度を変えることができる。

(3) 測定部

測定部は、(株)キーエンス製レーザラインゲージで投光部、受光部からなるセンサヘッド(VG-035T/R)とコントローラ(VG/300)から構成されており、流れてくるワークが投光部、受光部間のスリットを通る瞬間に外径の測定が行われる。

センサヘッド及びコントローラの主な仕様は以下のとおりである。

7. センサヘッド

光源	: 可視光半導体レーザ 波長670nm
検出範囲	: 0~350mm
CCD画素数	: 5000ピクセル
走査時間	: 1.3ms
サンプリング速度	: 780回/秒

1. コントローラ

最小表示単位	: 5μm
応答時間	: 3.9ms (平均時間)
デジタル出力	: RS-232C
セルフタイミング機能	有り

(4) 不良品排出装置

不良品排出用のエアダンパ、スロープ、受け箱から

構成されている。

(5) 良品格納マガジン

3連のマガジン、良品カウントセンサ、マガジン移動用のDCモータ、送りネジから成り、ワークガイドを流れてきたワークは、転がりながらマガジンに格納される。

(6) 制御部

動作の制御は、三菱電機(株)製マイクロシーケンサ(FX2-32MR)にブロック(FX-8EX)を2個を増設し使用した。

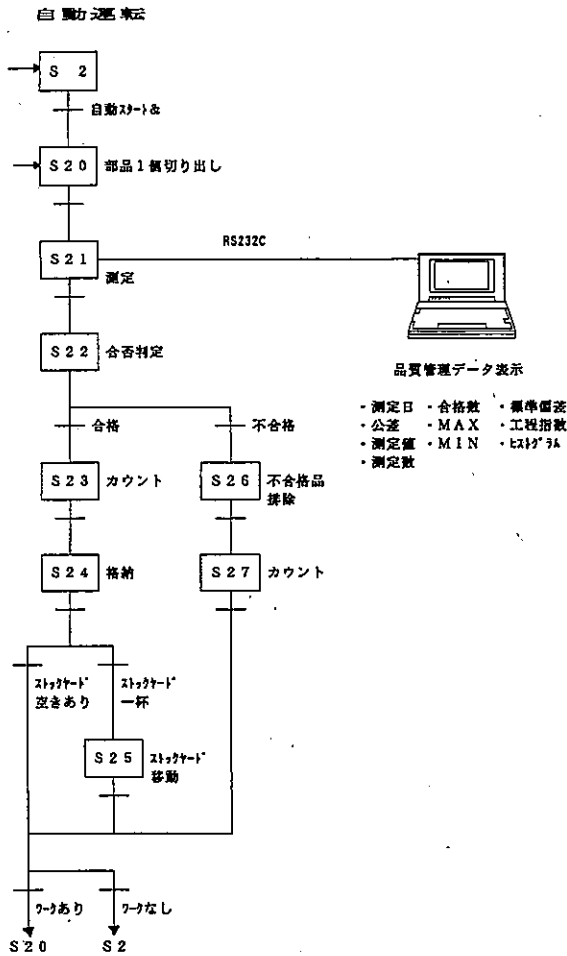
(7) 品質管理データ処理部

測定値は、コントローラからRS-232Cで出力されているので、このデータをパソコン上のデータベースソフト(マイクロソフト社Excel5)に取り込み、データ処理を行った。RS-232CデータのExcelへの取り込みは、通信ソフト(Excel用オンライン計測アドインソフト: Calclogger for windows)を用いた。

3. 動作概要

システムの動作概要は図4のフローチャートのとおりであり、動作プログラムは、SFC(シーケンシャルフローチャート)方式で作成した。

- (1) ワークプールマガジンにワークを供給する。加工ラインと直結すれば自動供給になるが、今回は手でセットした。
- (2) 自動スタートにより、ワークが有ればワーク切り出し装置が動作し、ワークが1個切り出されワークガイドに沿って、測定部に流れていく。
- (3) 測定部のスリットを通過する時、レーザラインゲージにより外径を測定する。その測定データはコントローラを通じオンラインでパソコンのデータベースソフトに取り込まれる。
- (4) コントローラの機能として公差を設定できようになっているので、公差外のデータがきた場合にはHIGH、LOWの信号が出力され、シーケンサに取り込まれる。
- (5) シーケンサにHIGH、LOWの信号がきた場合は、エアシリンダが作動しダンパが開き、不良品は受け箱に落下する。
- (6) (5)以外の場合はダンパは作動せず、ワークはワークガイド上を転がりながら、良品格納マガジンに収まる。
- (7) 格納マガジンが一杯になった場合は、モータが作動し、次のマガジンがセットされる。
- (8) 以下(2)~(7)を繰り返す。ただし(2)の自動スタートはスタート時のみ。
- (9) ワーク無し信号又は最後のマガジンが一杯になった場合は停止する。



4. 品質管理データ処理

品質管理プログラムはExcel上のビジュアルベーシック(VBA)で作成した。そのプログラムにCalcloggerでデータを取り込み統計処理を行った。

ある時期の製造工程の状況を把握するものとして、記述統計量、データ散布図、ヒストグラムがあるが、その1例を表1、図5、図6に示す。

表1 記述統計量

ロット番号	1
測定年月日	1996年6月11日
測定開始時刻	15:44:27
測定終了時刻	15:46:28

記述統計量

最大値	25.035
最小値	24.955
平均値	24.9982
標準偏差	0.020659945
範囲	0.08
工程能力値	0.403356992
データ個数	25
不良品数	5
不良率(%)	20
上側規格値	25.025
下側規格値	24.975

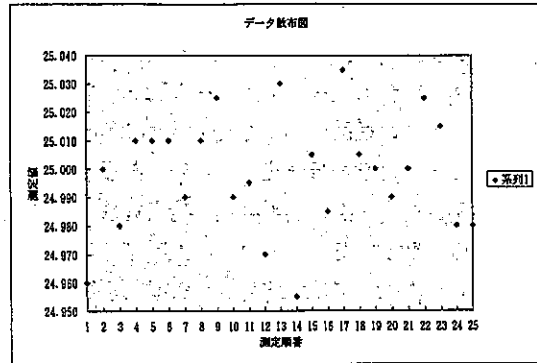


図5 データ散布図

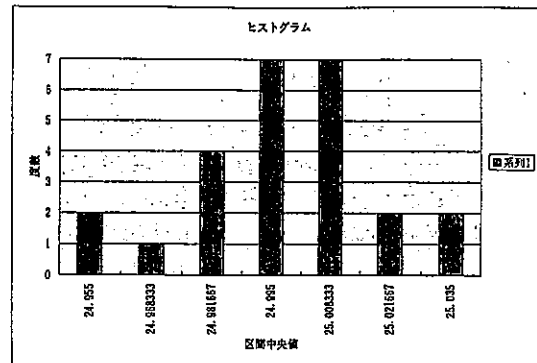


図6 ヒストグラム

また、連続した時間の流れのなかで製造工程の変化を知るものとして、Xbar-R管理図が有効であるが、その1例を図7、図8に示す。

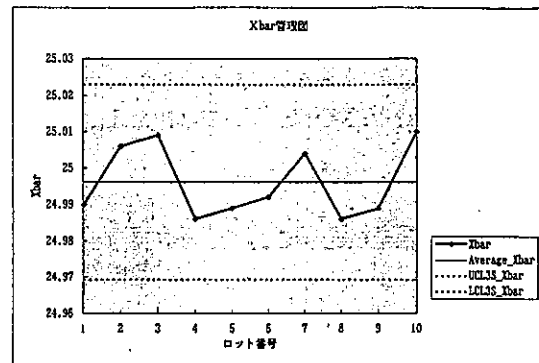


図7 Xbar管理図

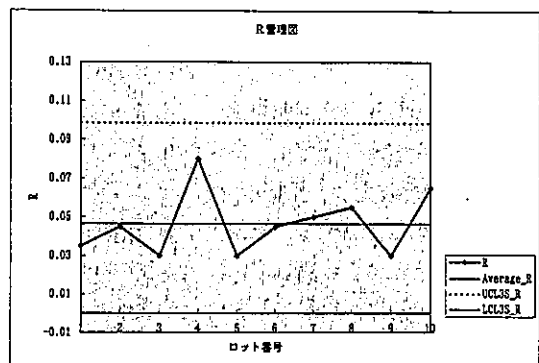


図8 R管理図

当システムは、移動するワークを自動測定することで一般に別個に行われてきた加工、良否判別、品質管理・工程管理データの採取という作業を同時に処理する、いわばオンライン計測・管理を行うものである。

今回は測定データを、良否判別、品質管理・工程管理にのみ利用したが、そのデータを加工機にフィードバックし、何らかの因子の制御信号とすれば、不良品が全く出ない自動システムの構築も可能となる。

一番簡単な方法は、不良信号が連続して出た場合は、その信号を機械のストップ信号とする方法であるが、ストップさせずに何らかの因子を制御し不良品が出ないようにするには、別の技術的問題を解決しなければならない。

また、今回は外径測定を対象としたが、当システムは幅、隙間、シャフトの振れ、複雑な形状のワークの位置・寸法や内径測定などにも適応できるものである。

その場合、ワークの供給方法、測定姿勢、測定方法に

ついて十分な検討が必要である。今回ような簡単な形状のものでも、ワークが多い場合は重量がかかり、一度に数個のワークが出てしまうことがあり、1個ずつ正確に切り出すためには、切り出し駒の寸法・形状を含めた切り出し装置部の考案が大きなポイントとなった。

6. 結 言

測定、検査、選別、格納、品質管理・工程管理データの採取をオンラインで自動的に処理できるシステムの構築という当初の目的はほぼ達成することができた。

現在のままで旋削部品の検査管理に十分対応できるとともに、検査管理に必要な標準的な要素と、ソフトウェアを備えているため、当システムの一部適用、変更、追加などにより、中小企業が検査管理システムを自動化しようとする場合、十分応用できる。

また、本システムは県内中小企業の自動化・省力化研修の教材としても利用しており、県内中小企業の技術力向上に役立てることができる。

衝撃圧を受ける円板の変形機構に及ぼす衝撃圧分布の条件と拘束条件の影響

石氷泰夫*・藤田昌大**・持原 稔***・苧阪浩男****
井山裕文**

Effects of Pressure Distribution and Boundary Condition on Deformation Mechanism
of a Circular Plate Subjected to Shock Pressure

Yasuo ISHIGORI, Masahiro FUJITA, Minoru MOCHIHARA, Hiroo OSAKA and Hirofumi IYAMA

衝撃圧を受けた円形金属板の変形機構について、衝撃圧分布及び拘束条件の影響を有限差分法によって明らかにした。

その結果、変形機構は衝撃圧分布の違いによって興味ある差異を示した。すなわち、衝撃圧分布が一定である場合、拘束された周辺から内部への曲げ波の移動により、頂上部が丸みを帯びた円すい状に成形され、一方、衝撃圧が中心から周辺に向かって直線的に減少している場合には、中心から周辺に曲げ波が移動し、浅い球面ドーム状に成形される。また、周辺の拘束条件の影響については、周辺が完全に固着している場合と型の上に置いただけの場合及び周辺を上下から初期板厚の幅で拘束した場合を解析したが、上下から板厚一定に拘束した場合は、周辺で板を固着した場合に変形機構が非常によく似ていることが認められた。また、型の上に置いただけの場合は、周辺を拘束されている場合に比べて、材料の内部への移動量が大きく成形時の内部応力が小さくなる傾向が見られた。

1. 緒言

爆発成形法などの高エネルギー速度成形法は、スプリングバックが小さく型形状への精密成形性の高い加工法であるとよくいわれ、実際各種精密部品の成形に利用されてきたが、良好な成形を達成するには材料や型形状に照らして適正な加工条件を選ぶことが肝要であり、その条件設定を誤ると成形状態が良港でなくなるのはいうまでもない。その条件を的確に捕らえるためには衝撃圧の条件、板の拘束条件などを現実に即して考え、それらが板の変形機構に対してどのような影響を持つか、また型成形を行う場合にどのような影響を与えるかについて、正しい認識を持つことが重要である。この種の変形は高速度にしかも密閉室内でなされるために光学的な観測はもとより、電気的その他の方法によっても、変形過程についての情報を実験的に得ることは極めて困難である。

一方、このような高速度でなされる現象では慣性力が大きなウェイトを占め、静的過程で問題になる摩擦なども運動方向に対向するよう働くので、条件設定が容易となり、数理的な説明によって現象の正当な説明が可能であると推察される。

筆者らはそのような観点に立ち、前報¹⁾において確立した数値解析シミュレーションの方法を適用して、爆発成形法における精密成形性のための条件設定を追求した。

本研究では衝撃圧の条件及び板の拘束条件を実際の条

件に近づけて与え、それらの条件が変形機構にどのように影響を及ぼすかを検討した。

2. 解析の内容

2.1 解析対象とするモデル

図1は、本研究で解析対象とする問題を図によって説明したものである。あらかじめ型のフランジ面の上に置かれ、周辺で何らかの拘束を受けた円板が衝撃圧を受けて自由張出し成形される問題を解析対象とした。

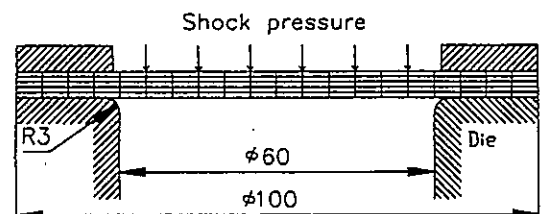


図1 解析モデル

2.2 板の拘束条件

試料である円板の拘束条件としては図2に示すとおりを考えた。このうちC-1は型の平坦部において板が完全に固着している場合であり、理想化された条件である。C-2は板が型の上に単に置かれている場合であり、板は型の上を滑るかあるいは浮き上がる。C-3は板押さえにより初期板厚のままに保持されている場合であり、C-2、C-3は現実的な立場に立った条件である。

* 生産技術部
** 熊本大学工学部
*** 鹿児島工業高等専門学校
**** 熊本工業大学

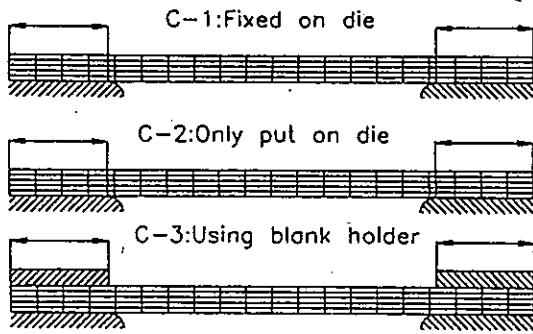


図2 板の拘束条件

2.3 衝撃圧の条件

試料に与える衝撃圧としては、図3に示すように三角パルスとした。継続時間 t_p は本論文では $10\mu s$ と固定した値を用いた。また、立ち上がりの時間 t_f は、 $t_p/5$ とした。

衝撃圧分布については芋阪らが行った密閉容器を用いた実験結果²⁾を参照して、図4に示す3とおりとした。

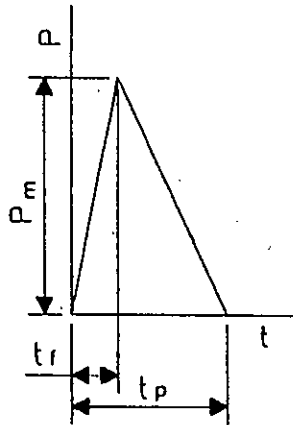


図3 衝撃圧モデル

彼らの実験結果では容器の内部形状が回転放物面状の時、試料の板面に作用する衝撃圧はほぼ一様分布となる。これを考慮して、P-1の条件を考えた。また、容器形状が回転双曲面状のとき、板面に作用する衝撃圧は中心から外周に向かって直線的に低下するように分布するとの結果を得ているが、これよりP-3の条件を考えた。またP-3の条件の典型的な場合としてP-2を取り上げるが、この条件による変形機構を検討することによって、P-3の条件の変形機構が明確になることをねらっている。

なお、 P_m 及び t_p の値については、芋阪らが回転放物面状の密閉容器を用い、その頂上部で6号電気雷管1個を爆発させた時の衝撃水圧の計測結果を参照して図4のように決定したが、他の2つの場合については、型の開口部(Φ60)の範囲内にもたらされる衝撃波エネルギーが、3つの衝撃圧条件の場合とも等しいという条件で、P-2及びP-3における中央部の P_{m0} を決定した。

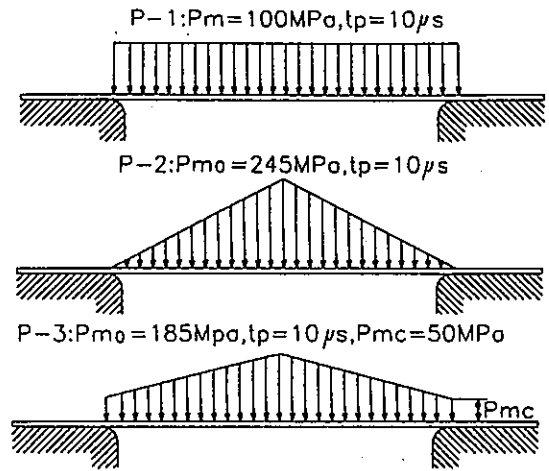


図4 衝撃圧の分布条件

2.4 対象としている材料

解析対象としている材料は銅である。構成式は、前回同様谷村の式を用いた³⁾。ただし材料の温度は全過程を通じて室温で一定とみなしている。

なお、解析は有限差分法を用いる数値解析によって行うが、詳細な記述は前報¹⁾に述べているので省略する。

3. 解析結果

3.1 拘束条件の影響

図5は、3つの拘束条件でC-1、C-2、C-3の各場合について過程途中($t=100\mu s$)の変形状と上下両表面層での子午線方向応力の分布を表す解析結果である。なお、衝撃圧の条件はP-1つまり一様分布の場合である。

前報において述べたように上下表面層の子午線方向垂直応力の平均は、面内応力つまり膜力成分であり、両者の差は曲げ変形によってもたらされる応力、つまり曲げ応力と見なしてよい。この問題に関連して、変形過程の進行に対応した曲げ波の伝ば過程については、前報に詳しく述べているが、拘束条件の影響までは踏み込んでいない。3つの拘束条件のいずれの場合にも型の肩部近傍及びそれより外部を除いて、曲げ波伝ばの機構はほとんど同じであるが、型のR部近傍では、B3~B4の上に凸の曲げ、それに続いてB4~外周にも上に凸の緩やかな曲げが生じている点が、C-2の条件の場合の特徴として現れていて、他の2つの場合と著しく相違している。C-1、C-3の条件では板が固着ないし板押さえによる上方への変位抑止効果のために、R部近傍の一部に限られ、それより外側部分は膜力成分のみである。また、膜力成分についていえば、C-1、C-3の場合に比べて、C-2の条件では外周部が拘束されていないために、変形が進行している開口部内も含めて、全体に応力レベルが低くなっているのが特徴的である。

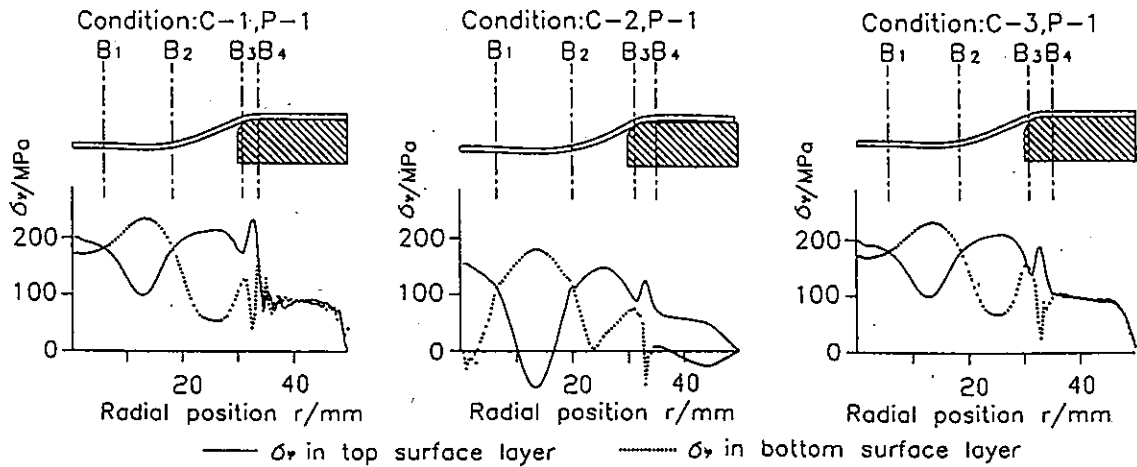


図5 変形過程における板の上下表面層の子午線方向応力分布と変形状 (t = 100 μs)

図6は3つの条件下での最終変形状を示している。また、図7はC-2及びC-3の場合についての最終変形状から型のR部近傍の変形状を拡大して示したものである。

この図において当初型の平坦部とR部の境界点C上にあった要素の変形後の位置をC'で表している。C-2の条件下では流入移動量が著しく、その上に上述の曲げ変形が著しいために、下に凸の折れ曲がりを生じている。図6に示す最終変形状では、平坦面上で板は反発して

型から離れているが、変形深さは他の2つより深くなっている。C-3の条件下ではC'点の流入移動がほとんど見られず、最終変形状は型のR部に接線を引いた状態で傾斜面が形成されている。C-3の条件下での最終変形状はC-1とほとんど同じであり、また応力分布図もC-1と極めてよく類似していることから判断して、C-3の条件は固着の条件に極めて近いと判断して良い。

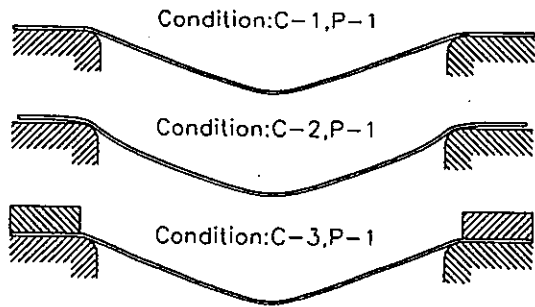


図6 最終変形状

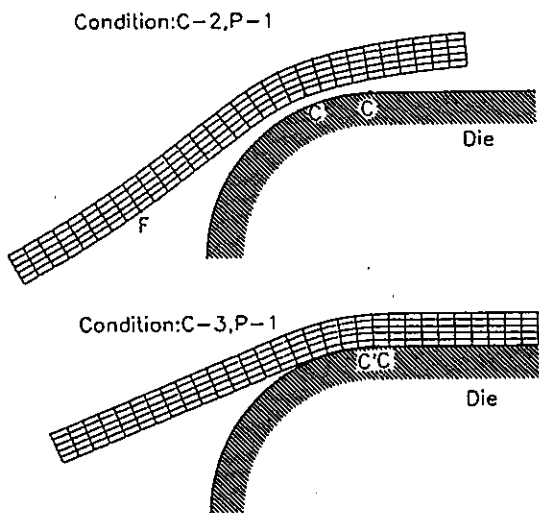


図7 型の肩部における材料の流れ

3. 2 衝撃圧分布の相違による変形機構の相違

図8は自由張出し成形を対象として、3つの衝撃圧分布に対する変形機構の相違を示している。いずれも板周辺の拘束条件はC-3、つまり板押さえを用いる条件で解析している。衝撃圧分布が均一な場合つまりP-1の条件では、前報で既に説明したように外周部から内方へ曲げ波が移動し、その曲げ波の移動と共に傾斜面が外周部から中心へ形成されていくが、P-2の衝撃圧分布の条件ではこれと全く異なる変形機構となる。衝撃圧の作用は極めて短時間に終了するため、変形がほとんど進行しないうちに終了している。従って、変形の初期に衝撃圧分布と相似の変位速度分布が与えられる。つまり中心で最大速度、型の内縁(肩のRの開始点)において速度0の直線的な分布をなしている。これは型の内縁を中心とする回転運動を与えるものであり、初期にはこの回転運動によって変形が開始する。やがて中心部は回転運動に伴う引張作用により巨大な引張応力を生じ、球面ドーム形へと変形する。これは均一な等2軸応力を生じるための変形状であり、その均一な応力領域が外方へと広がるとともにドーム状の変形領域も外方へと広がる。外方では依然として型内縁周りの回転運動が継続しているが、やがてそこにドーム状の変形波が到達して、全体が球面ドーム形へ変形して変形過程は終了している。下の図はt = 100 μsにおける上下表面層の子午線方向分布を示している。この段階では半径位置20mm内の箇所内までは、明らかに面内応力(上下表面層の応力の平均)

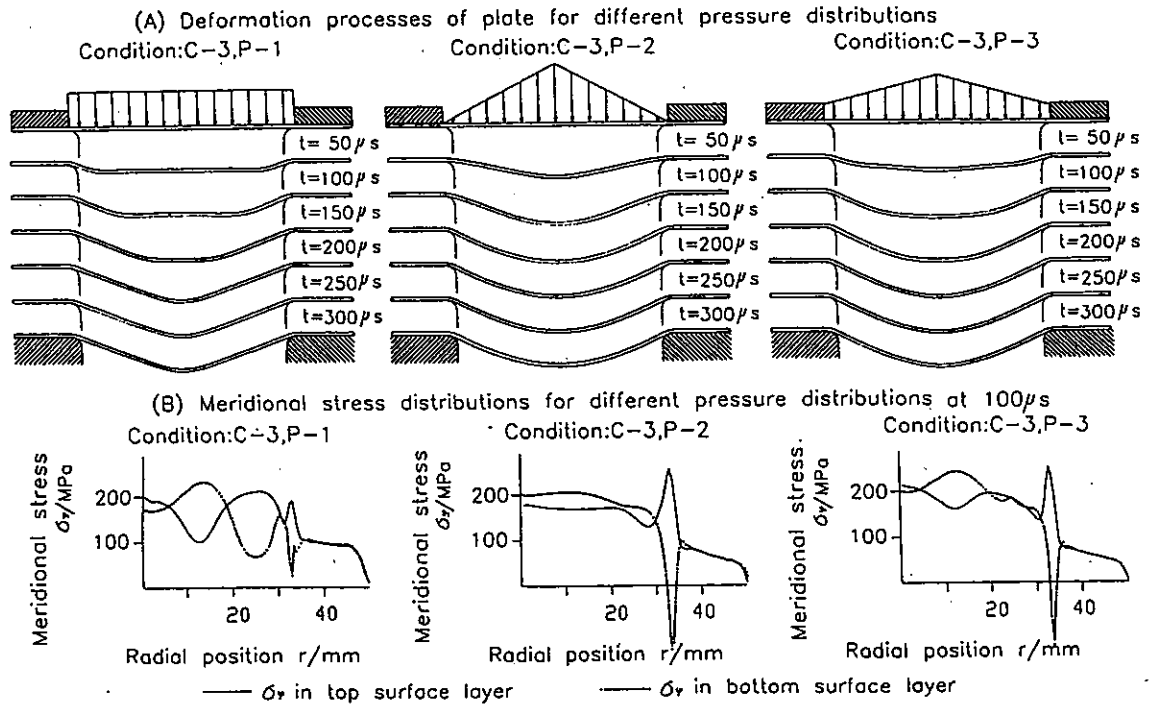


図8 板の変形過程と子午線方向応力分布に対する圧力分布の影響

はほぼ一定で、しかも上層の応力が丸みを帯びた分だけ下層の応力よりわずかに大きくなっていて、この範囲で第2軸のドーム状の変形が達成されていることを立証している。半径位置25~30mmでは型の肩曲面に沿った曲げ変形による上に凸の曲げ応力が生じており、半径位置20mm弱から25mmにかけては両者の曲げ変形を結ぶ面となったとみなされる。この部分では下に凸の曲げ変形を伴いながら、引張が増大しつつある状況を示しているが、やがてこの部分にもドーム状変形が広がり、応力も内部と同じ値に増大するものと思われる。

宇阪らも衝撃圧が中央部で平坦であるが、その外側では外周部に向かうにつれて直線的に低下する分布の場合について変形の解析を試みており、その結果としてここで述べた外周縁回りの回転と中央部の面内引張を生じる変形機構を説明している⁹⁾。しかし、彼らの問題では衝撃圧が中央部で平坦になっていること、そして変形機構の説明において応力分布まで言及していないことから、明確な説明には至っていない。

P-3の条件の場合には、型内縁において有限の変位速度を有しているために、P-1の場合と同様に外周から内方に伝達される曲げ波が発生する。それに加えて、変形過程の初期には、圧力こう配による変形傾斜面が形成される。やがて曲げ波の進行により中央部は引張作用を受けるために、中央部は平坦面に近くなり、その後曲げ波が中央に達して全体に丸味を帯びた形状が形成されている。変形機構からいえば、初期に衝撃圧分布によって作られる傾斜面を除けばP-1と類似しているが、最終的な変形形状はP-1とP-2の丁度中間の形状と

なっている。t=100 μsにおける応力分布図も、P-1とP-2の丁度中間的な特徴を有している。この場合の特徴は初期に変形面(中央部が突出している)が形成されるため、変形の途中においてP-1の場合に見られる中央部の凹みが生じないことである。

図9はこれら3つの場合の中央点の変位速度の変化を示している。P-1の場合には初期において力積によって与えられる変位速度 $V_y=52\text{m/s}$ に達するが、やがて凹みの形成により減速した後加速に転じ、最高速度 $V_y=85\text{m/s}$ に達している。その後、急に減速して速度0を通過した後、振動を繰り返して静止に至っている。これに対してP-2の条件の場合には、初期に力積によって与えられる速度に達した後、等2軸引張の膜力の働きによって減速作用を生じ、一定の減速度で減速し始め、手前で若干速度が維持されるが、その後振動を繰り返し静止に至る。このようにP-2の場合には、P-1の場合と中央点の速度変化を含めて変形機構が全く異なっている。P-3の条件の場合には、P-2と同様初期に力積によって与えられる速度に達した後、膜力の働きにより中央点の速度が減速するが、その割合は初期にもたらされる変形傾斜角が小さいため、P-2より小さい。やがて減速は停止し、その後若干の加速を生じた後、再び減速し静止に向かう。この静止直前の加速はP-1の場合に比べると著しく小さい。このようにP-3の条件の場合にはP-2の場合の前半における減速と、P-1の場合の終わりの段階での加速の両方の特徴を合わせ持っている。

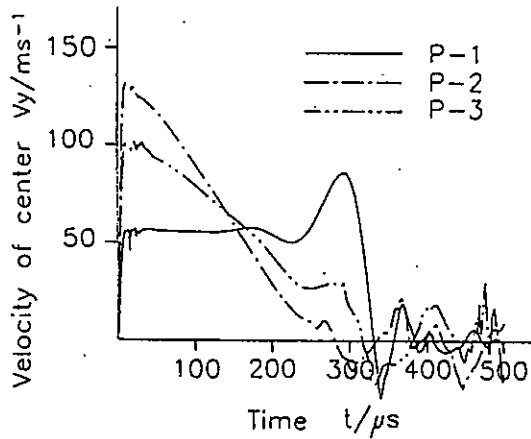


図9 板の中央部の飛しょう速度の変化

4. 結 言

以上、衝撃圧を受ける円板の変形機構について、板の拘束条件の影響及び衝撃圧分布の影響を数値解析シミュレーションによって検討した結果を述べた。さらに、浅い球面凹型への型成形について変形機構を検討し、良好な成形を達成するための条件を検討した。以上の結果から次の結論を得ることができた。

- (1) 外周部での拘束条件に関しては、板押さえを用いる場合には応力分布、変形形状、材料の流入について、外周部が、型の平坦面上に固着されている場合とほとんど一致する結果が得られた。また、板を型外周の平坦面上に置くだけで拘束を加えない場合には、開口部内への材料の流入が著しくなり、さらに上部への変形に対する抑止力がないので、型のR部近傍で下に凸の急激な折れ曲がり変形が生じ、その外側には上に凸の曲げ変形が生じた。
- (2) 円板の中央部で高い圧力を有し、型開口内縁で圧力

0となる直線的に降下する衝撃圧分布の場合について、円板の変形機構が求められ、一様分布の衝撃圧の場合とは全く異なることが示された。この場合、衝撃圧分布と相似の変位速度分布が与えられるため、当初の変形は型の内縁を回転軸にした回転運動によって開始するが、その運動のため中央部に巨大な引張りを生じようとする。そのために等2軸引張り状態となり、中央部には球殻上の丸味を帯びた変形波が発生する。この変形波は中央から外周へ向かって広がり、それと共に球殻の領域を拡大して、外方の回転運動による変形と接続する変形形状となる。

直線的なこう配を持つ衝撃圧分布であっても、型開口部内縁において衝撃圧が0まで低下しない場合には、一様分布の場合と同様に外周から中央へ向かう曲げ波の伝播が生じ、それと衝撃圧分布と相似の速度分布による変形機構が中央部から誘起され、両者が組合せられた変形機構となる。

文 献

- 1) 石水泰夫、藤田昌大、持原稔、宇阪浩男、伊東繁、
“周辺固定円板の横衝撃変形の数値解析”
本誌 No.33, P. 21-26(1995)
- 2) 宇阪浩男、藤田昌大、藤中雄三、花崎紘一、
“密閉容器を用いる爆発成形法における成形素板の変形過程” 塑性と加工 Vol. 27, No.303, P. 487-493(1986)
- 3) Tanimura, S. “Constitutive Models for Dynamic Behavior of Materials”. Proceedings of International Symposium on Impact Engineering. Vol. 1, p. 17-26(1992)
- 4) 宇阪浩男、藤田昌大、花崎紘一、藤中雄三
“衝撃荷重を受ける金属素板の変形の数値解析” 塑性と加工 Vol. 27, No.301, P. 288-294(1986)

射出原料の熱的特性と成形条件最適化方法

—新素材粉末の射出成形法—

上村誠*・木村幹男*・河野敏謙**・中川博文***

Thermal Characteristics of Raw Materials and Optimization of
Conditions in Injection Molding

-Injection Molding of New Material Powders -

Makoto UEMURA*, Mikio KIMURA*, Toshinori KAWANO** and Hirofumi NAKAGAWA***

オーステナイト系ステンレス鋼粉末の射出成形において、射出成形原料の物理的特性を管理し、最適射出成形条件を決定することにより、他の粉末を出発原料としたときにも応用できる粉末射出成形条件最適化方法を考案した。また、同様にして粉末の粒度分布が粉末射出成形原料の物理特性にどのような影響を及ぼすか検討し、次のような結論を得た。

負荷圧力を5~20kgf/cm²の4段階、原料温度を120~150℃に変化させメルトフロー試験を行い射出原料の粘度を測定した。同様に20μ以下の鉄系粉末SUS304L、SCM415、SKH57のメルトフロー試験を行ったところ、基準粉末(DAP316L)と同等の粘度が70~90℃の範囲に存在することがわかった。また、回転数を10~100rpmの6段階、試験温度を120~150℃に変化させミキサー試験を行い射出原料のトルクを測定した。同様に20μ以下の鉄系粉末SCM415、SKH57のミキサー試験を行ったところ、基準粉末と同等のトルクが70~90℃の範囲に存在することがわかった。以上より、ステンレス粉末で最適化した射出条件を用い、その他の粉末を出発原料とした射出原料を最適に成形することができた。

1. 緒言

近年、金属粉末射出成形法(MIM法)による焼結部品製造は、はん用の構造部品において量産化の傾向が強¹⁾い。これはMIM法が3次元の複雑形状品のニアネットシェイプという点において、コストダウンにも有効であるという認識が、市場において一般的になったからに外ならない。

しかし、量産品においても技術的に解決すべき問題点や製品品質を安定して量産するために確立すべき要素技術は数多く残されている。

最近の研究では、金属粉末射出成形法による複雑形状部品の製造技術に関する研究が数多くなされている。なかでも、MartynやHensらは複雑形状部品の製造方法、特に形状付与や寸法精度に関する必要条件の報告をしている²⁾。著者らも射出原料と焼結体の寸法、表面精度などに関する報告をしてきた³⁾。しかし、プラスチックのそれと同様に、最適な成形条件を導き出すための方法や成形不良の解消方法⁴⁾についての研究は少ない。

そこで、著者らは成形特性がバインダーの物理的特性や射出成形原料の調整方法などに大きく影響し、しかも成形品の良否に関わりが大きいと考え、射出成形原料の物理的特性と成形品の表面欠陥との関係、さらにはそれ

に応じた成形条件の決定方法について検討した。さらに、粉末の粒度分布の違いがどのように射出成形原料の物理特性に影響を与えるのかについて検討したので報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材料

射出成形条件最適化実験に使用した粉末は、従来当センターで使用している大同特殊鋼(株)製オーステナイト系ステンレス鋼粉末DAP316L、およびUFPテクノロジー社(米国)製オーステナイト系ステンレス鋼粉末のSUS304L、クロムモリブデン鋼粉末SCM415、高速度工具鋼粉末SKH57を使用した。また、射出原料の粉末粒度が及ぼす影響に関する実験ではUFPテクノロジー社(米国)製オーステナイト系ステンレス鋼粉末316Lの粒度分布の異なる4種の粉末を用いた。ここでは、それぞれ10、15、20、30μm以下の粒度分布のものをUFP10、UFP15、UFP20、UFP30と呼ぶことにする。なお、すべての粉末はアルゴンガスを用いたガスアトマイズ法によって製造されたものである。

次に、結合材としては従来より当センターで使用してきた、三菱レーヨン(株)製ダイヤナールBR-105レジン、(株)中京油脂製セルナNE-119ワックスを重量比1対1で混合したものを用いた。

粉末の化学組成を表1、粒度分布を表2、製造メーカーに

* 生産技術部

** " (現、熊本県計量検定所)

*** 中川電設(株)

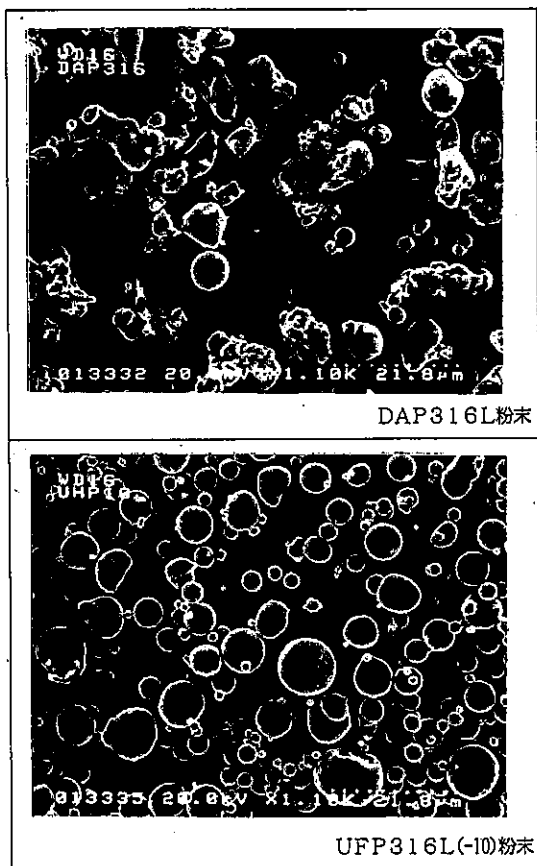


図1 粉末の電子顕微鏡観察結果

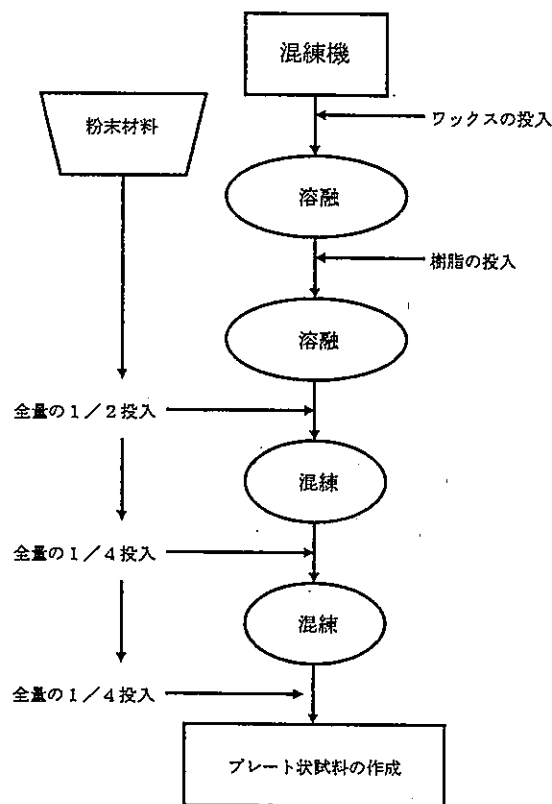


図2 混練工程の概要

よる粉末形状の違いを電子顕微鏡を用いて観察したので観察写真の例を図1に示す。

表1 粉末の化学組成

粉末の種類	組成 (%)										
	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	W	V	Co	C	
DAP316L	17.53	13.05	2.1	0.15	0.7	-	-	-	-	0.013	
UFP304L	19.6	11.9	-	0.09	0.67	-	-	-	-	0.023	
SKH57	4.3	-	2.6	0.16	0.26	-	10.5	3.4	9.7	1.35	
SCM415	1.18	10.12	0.28	0.85	0.31	0.01	-	-	-	0.152	
UFP316L(-10)	17.3	12.6	2.5	0.19	0.48	-	-	-	-	0.026	
UFP316L(-15)	17.3	12.6	2.5	0.19	0.48	-	-	-	-	0.026	
UFP316L(-20)	19.6	12.7	2.6	0.76	0.75	-	-	-	-	0.004	
UFP316L(-30)	17.3	12.6	2.5	0.19	0.48	-	-	-	-	0.026	

表2 粉末の粒度分布

粉末の種類	粉末粒度 (μm)									
	0-1.9	1.9-2.6	2.6-3.9	3.9-5.5	5.5-7.8	7.8-11	11-16	16-22	22-31	31-44
DAP316L	-	-	19.8	-	-	60.2	83.6	91.3	99.0	100
UFP304L	0.2	1.7	5.6	15.2	27.8	47.8	71.2	91.0	100	100
SKH57	0.0	1.1	5.4	15.1	25.8	44.2	70.5	92.7	99.9	100
SCM415	0.2	1.7	5.0	13.3	28.3	47.9	75.4	95.1	100	100
UFP316L(-10)	1.2	5.0	13.7	31.8	61.6	87.4	96.2	100	100	100
UFP316L(-15)	0.7	3.5	10.9	23.3	44.0	73.5	94.7	100	100	100
UFP316L(-20)	0.0	1.3	5.4	14.0	25.9	45.0	71.4	92.1	100	100
UFP316L(-30)	0.0	1.0	3.5	9.4	18.3	32.4	51.8	72.1	90.9	98.6

2.2 混練

混練方法としては、基本的には従来より当センターで用いている図2に示す方法を用いた。特に粉末の投入量管理、粉末投入インターバルの管理、混練終了時の温度測定等を行い、混練条件が一定となるようにして行った。その後、かくはん容器から混合物を取り出し直径10cm・厚み5mm程度のプレートにして室温まで放冷した。

従来法との違いは、粉末の投入が3回で終了する点で初回に1/2量投入し続いて1/4量を2回投入する。それぞ

れの粉末投入までのインターバルは1時間・30分・1時間である。

2.3 成形

成形実験では出発原料をDAP316L粉末としたものを用い、作製したプレート状の成形原料を射出成形可能なペレット状に加工した後、三菱重工(株)製横型スクリー式射出成形機(80MSP-2.5A)で成形した。成形実験は可変条件を成形温度、射出圧力、射出速度、金型温度とし実験計画法によるL9直行表を用いて行った。このときの実験条件を表3に示す。また、成形体の評価方法は、評価項目をジェットイング、質量誤差、湾曲(そり)、表面状態の4項目について行い各項目につき最良を5点、最低

表3 実験計画法による射出成形実験

条件番号	樹脂温(℃)	型温(℃)	射出圧力(%)	射出速度(%)
PTN1	120	30	40	40
PTN2	120	40	50	50
PTN3	120	50	60	60
PTN4	130	30	50	60
PTN5	130	40	60	40
PTN6	130	50	40	50
PTN7	140	30	60	50
PTN8	140	40	40	60
PTN9	140	50	50	40

を1点として20点満点で評価した。

2.4 密度測定

混練後の成形原料について密度の測定を行った。作成したプレートから一定体積量の試料を採取し、マイクロメリテックス社製ガス置換方式密度計 (AccuPyc 1330) を用い試料真密度を測定した。

従来採用している混練方法は雰囲気が減圧下であるため、様々な装置コンディションにより混練機内の真空度が変化していることが予想される。また、混練時の温度は140℃~150℃と、結合材がガス化する温度域で行っている。これらのことより、同一の条件で混練した場合でも結合材のコンパウンド中における割合が変化することが予想される。そこで本研究では、粉末の密度及び作成したコンパウンドの密度測定を行い、結合材の体積割合を算出することにより、その後の実験の結合材割合の基準とすることを試みた。

2.5 メルトフロー試験

混練後、ペレット化した射出成形原料について島津製作所製定荷重押出し型細管式レオメータ (フローテスタ CFT500C) を用い、温度-粘度 (定温法)、温度-せん断速度 (定温法)、温度-MFR (定温法) について測定した。なお測定にはダイ長さ、ダイ穴直径共に1mmのものを用いた。また、供試材料はあらかじめ円柱状に成形し、試料長さを統一して行った。

2.6 ミキサー試験

ペレット化した射出成形原料について可塑性及び熱的安定性試験として、(株)東洋精機製作所製ラボプラストミル (50C150) を用いミキサートルク試験を行った。

ミキサーブレードはローラ型のものを用い、2軸混合を行う際の定温でのトルクを検出した。試験時間は、各試験条件とも30分間とし、時間経過とともにトルク値が変化しないかも併せて測定した。

3. 結果と考察

3.1 最適成形条件

射出成形は、プラスチックの成形法として一般化した造形加工法であるが、近年は、各種繊維や炭酸カルシウムなどの無機物をプラスチック中に導入して強度・剛性・耐熱性を強化してエンジニアリングプラスチックとして使用する例が増えている。同様にして、金属粉末射出成形法においても有機バインダー中に粒径が0.1~100 μmの粉末材料を添加して成形加工を行う。有機物中に異物を添加して成形するという点において両者は類似の加工といえる。

しかし、プラスチックの射出成形原料と粉末の射出成形原料においてその有機物比率をみるとプラスチック+強化物では流動性に寄与するプラスチックが80~90vol%、

有機物バインダー+粉末では流動性に寄与する有機バインダーが30~40vol%とかなりの違いがある⁶⁾。したがって、それらの流れ特性は全く違うものとなり、射出成形条件はおのずと違うものとなる。

エンジニアリングプラスチックの粘度-温度の関係はリニアであるが⁷⁾、粉末射出成形原料のそれは不連続である。それは、粉末の粒度分布の不規則性や不連続が原因となって射出成形温度域での成形原料の流れ特性を変化させているからである。したがって、有機バインダー+粉末を射出原料とした射出成形の最適成形条件はそれぞれの因子において非常に狭い範囲となる。

粉末射出成形時に発生する不良品は、金属粉末の射出成形プロセスにおいて、最も初期に確認できる不良であり成形後の修正が不可能なものが多い。不良が発生した場合は、成形体を再ペレット化しリサイクルする必要がある。この場合工程の増加や、2次原料内への不純物の混入などの問題が発生する。したがって、成形不良を未然に防ぐことは量産化にとって重要な品質安定要素となる。

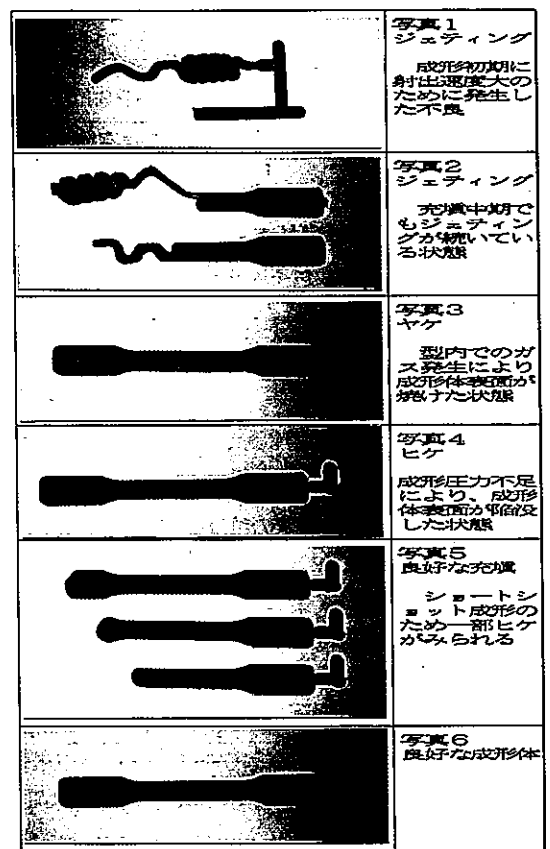


図3 射出成形体の表面欠陥の観察

成形不良の形態はプラスチックのそれとよく似ている。図3に粉末射出成形時に発生した成形不良の例を示す。これらは粉末の射出成形で比較的発生頻度の高いもので、ジェティングとはバラス効果 (圧力記憶効果) と、射出速度の大きさと方向及び流動抵抗によって生じるスネー

表4 成形体の評価結果

条件番号	ジェティング	質量誤差	湾曲	表面欠陥	合計点
PTN1	1	1	1	1	4
PTN2	1	1	1	1	4
PTN3	4	4	2	2	12
PTN4	4	4	5	4	17
PTN5	3	5	3	3	14
PTN6	5	2	2	2	11
PTN7	3	3	4	5	15
PTN8	4	4	4	3	15
PTN9	5	4	2	2	13

クマークや爪マークなどの成形不良である。外に、成形不良にはヒケ・バリ・充てん不足・フローマーク・ウェルド・シルバーストリーク・気泡・光沢ムラ・ヤケ・ワレ・そり等の項目がある¹⁾。表3の実験により成形した成形体の評価結果を表4に示す。これよりPTN4が9パターン中最高の17点と、最も良好であったことがわかる。

最適成形条件は樹脂温130℃、金型温度30℃、射出圧力50%、射出速度60%であった。

3.2 粉末の物理特性

成形条件最適化を行ったDAP316L粉末を射出成形の出発原料とした、レオメータによる粘度-温度(定温法)測定結果および、原料粉末を粉末粒度分布が20μm以下のSUS304L、SCM415、SKH57相当品としたときのレオメータによる粘度-温度試験の結果を図4に示す。原料粉末をDAP316Lとした場合は、負荷圧力を5~20kgf/cm²としている。この場合、圧力の上昇とともに粘度が低下し、最適射出成形温度の130℃付近では粘度10000~20000(Poise)を示すことが分かった。図からDAP316L粉末が最適に成形できた130℃付近の粘度はSUS304L、SCM415、SKH57を原料とし負荷圧力を10kg/cm²とした場合の70~80℃付近の粘度とほぼ等しいことが分かり、温度変化による粘度こう配がDAP316Lのそれより大きいことから、成形に最適な温度域が狭いことが分かる。なお、これらの射出原料への結合材の添加量はすべて10wt%と固定している。

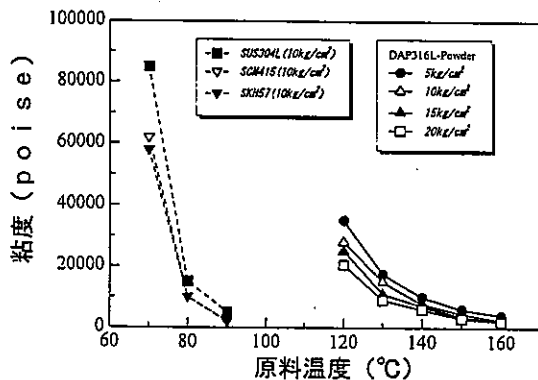


図4 射出原料の粘度-温度線図(定温法)

次に、DAP316L粉末を出発原料とした射出原料のミキサー試験機による回転数-トルク測定結果をおよびSCM415、SKH57を出発原料とした射出原料の回転数-トルクの測定結果の一部を図5に示す。射出原料温度を成形温度付近の120~150℃に設定し2軸ニーダの回転数を10~100rpmとしたときのトルクを測定した。なお余熱は行わず試験時間は30分間と一定にし、射出原料の熱的安定性を確認した。

また、トルク値はミキシングの前期、中期、後期の値を平均し全体のトルクとした。図より、DAP316Lが出発原料の場合、射出原料温度が120、130℃の場合は回転数の上昇とともにトルク値が不連続に上昇しているのが分かる。また150℃では回転数を上げてトルク値がほぼ一定であることが分かった。これは成形原料温度が比較

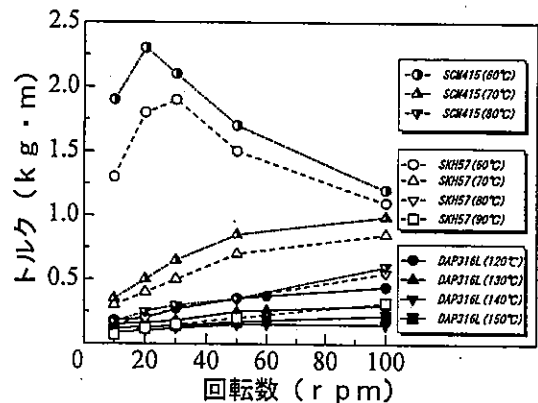


図5 射出原料の回転数-トルク線図

的高い場合可塑性にはスクリーの高回転は必要ないことを示している。

成形原料温度140℃では回転数とトルク値がほぼニアな関係にあり、この射出原料自体はこの温度域で可塑性及び成形時の条件選択が比較的容易なことが分かる。

また、同様に原料粉末を粉末粒度分布が20μm以下のSCM415、SKH57相当品としたときのミキサー試験機による回転数-トルク測定結果から、この粉末材料を出発原料とした場合には80℃付近で回転数とトルク値がほぼニアな関係にあり、この射出原料自体はこの温度域で可塑性及び成形時に条件選択が容易なことが分かる。また、このときのトルク値はSUS316L粉末を出発原料としたときのトルク値とほぼ等しいことが分かった。

3.3 成形条件最適化法

射出成形を行う場合次のような項目の成形条件を最適化しなければならない。温度設定(シリンダ各ゾーンの温度分布、ノズル温度、金型温度、原料温度等)、圧力設定(射出圧、保持圧等)及び射出速度(スクリー前進速度)、可塑性条件(スクリー回転数、背圧)である。

一般には、温度、速度、圧力、位置、時間という5大要因をそれぞれ上下させ製品品質をみながら要因上限と

下限の中間値を設定して最適条件としている（従来の最適化法）。

本研究では、実験計画法により最適化したDAP316L粉末の成形条件を固定して温度、時間因子のみを調整しどのような射出原料を用いるときにも最適な成形ができる成形条件最適化法を考案した。その概略を図6に示す。

図の左半分が従来の粉末射出成形のプロセス全体像である。混練あるいはペレット化工程後の射出原料の物理特性をメルトフロー試験及びミリング試験により測定し、DAP316Lコンパウンドと同様の物理特性が発現する温度域の存在を確認する。その温度域が確認されればその温度条件でDAP316Lコンパウンドと同様な射出条件で成形が可能であることになる。

この方法を用いると、成形条件の決定時間を短縮できることや、オーバーショットによる金型破損の防止、可塑化ミスによるスクリーへの損傷、成形原料の節約、成形原料リサイクル時間の節約などのメリットがある。加えて、テストショットを繰り返しても最適成形条件が見つからないという事態を未然に防ぐことができる。

この方法を用いて鉄系のその他の粉末を成形したところ比較的良好な射出成形体を得ることができた。

また、図中にある熱分析を用いることによって結合材を他のものに変更した場合も、射出原料の加熱限界を決定することができるので、この方法は結合材の選定を変えたときにも有効であるといえる。

今回の実験では、鉄系粉末の材質を種々変化させ成形原料を作成した。粉末製法が同じにもかかわらず図1で分かるように粉末の性状が粉末製造メーカーによって異なっている。このことが、図4、図5に示した射出原料の物理特性に大きく影響を与えそれぞれ大きく異なった挙動となっていることはいうまでもない。したがって、使用経験のない粉末を用いて、射出原料を設計する場合にも今回の成形条件最適化法は有効であることになる。

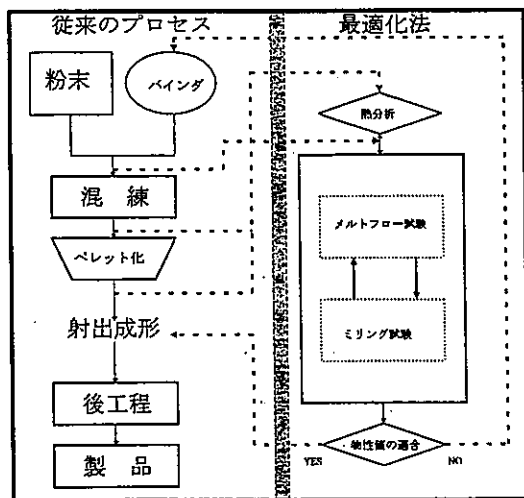


図6 成形条件最適化法の概略

3.4 粉末粒度と成形原料

粉末粒度の異なるUPP粉末に、結合材を重量比6~9wt%配合した射出成形原料の真密度の測定を行った。例としてUPP10粉末を出発原料とした場合の結果を図7に示す。なお、縦軸に密度、横軸に結合材添加量(VOL%)をとっている。ここで、結合材の添加量0%とは使用した粉末の真密度で、結合材の添加量100%とは結合材そのものの真密度を示している。結果より、今回行った混練工程では、計算上の真密度と理論値がほぼ一致し、同ロット内での真密度の値のばらつきも無かったことから、適正な均一混練が達成されていることが分かる。ただし、UPP30の粉末を用いた場合をみると、その密度値が想定される射出原料理論密度（計算値）と違っている。これは、粉末の粒度分布が比較的大きくなると混練時の粉末の均一分散の度合いが低下するのではないかと考えている。したがって、今回のような混練方法を用いる場合、20 μ m以

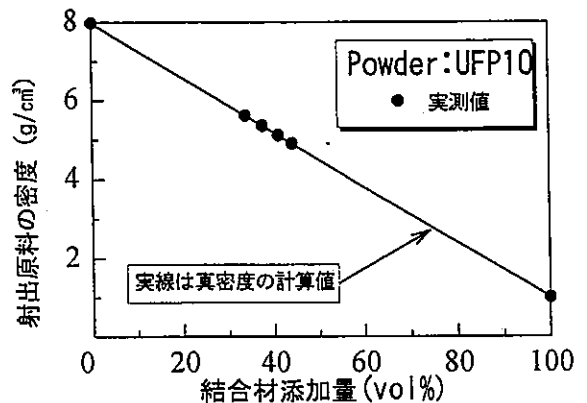


図7 射出原料の真密度

下の微粉末を原料とした方が品質がより安定した製品を製造できることがわかった。なお、重量比での6~9wt%の配合は体積比で約33~44vol%に相当する。

次に、UPP粉末を出発原料として結合材添加量を6、7、8、9wt%、試験温度を約80~150 $^{\circ}$ Cとしたときの射出成形原料の温度-トルクの関係を測定した。例としてUPP10

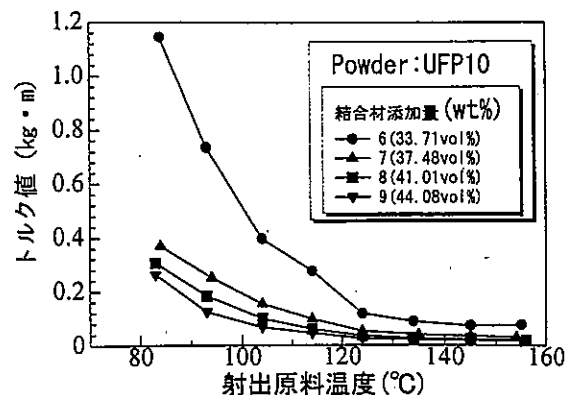


図8 射出原料の温度-トルクの関係

粉末を出発原料とした場合を図8に示す。なお、その他の試験条件の主なものとしては、試験回転数を10rpm、

ミキサータイプをロータリ型、キャビティを60ccとした。

図より、粉末粒度及び結合材添加量について、温度の上昇とともにトルク値が低下し120~130°C付近である一定の値で安定していることが分かる。これは、すべての粉末粒度のものについて同様の傾向であった。このことから、可塑化は120~130°Cの温度域までの昇温で十分であることが分る。逆に、これ以上の昇温は結合材の分解やガスの発生を招くので、可塑化を行うシリンダ部分の温度設定はこの温度域でとどめる必要があることが分かった。

次に図9に結合材添加量6wt%の4種類の粉末粒度を持つ粉末の温度-トルクの関係を示す。これにより、120°C以下の比較的低温域では粉末粒度の違いによる成形原料のトルクに大きな違いは認められないが、120°C以上の比較的高温域では粉末粒度が大きくなるとそのトルク値が大きくなっていることが分かる。特にUFP30は極端にその値が大きくなっている。また、20 μ m以下の粉末は全温度域でほぼ同様の傾向を示している。以上より、可塑化が完全に行われる120°C超の温度域では、射出原料のトルク値を決定する主因が粉末粒度にあり、それ以下の温度域では結合材の物理特性が射出原料のトルク値を決定する主因になっていることが分かった。

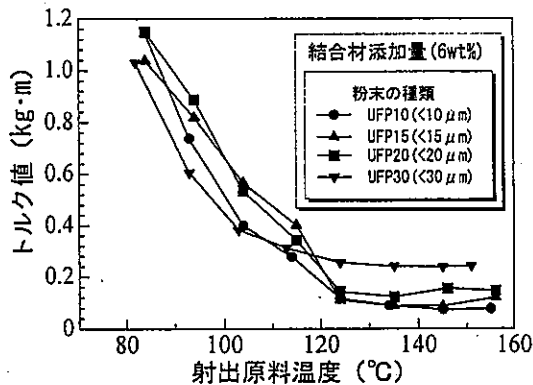


図9 粉末粒度によるトルクの変化

なお、これらの粉末も温度-トルク試験の結果から120°C付近に最適成形温度が存在することがDAP316L粉末の物性データ(図5)から推測できる。

4. 結論

- 1) オーステナイト系ステンレス鋼粉末を出発原料としたときの最適成形条件を求めた。その条件は射出原料温度130°C、金型温度30°C、射出圧力50%、射出速度60%であった。
- 2) 良好な成形体を得ることができた成形温度において射出成形原料の物理特性を数値化した。
- 3) 数種の鉄系粉末を用い、結合材を任意量添加した射出原料について物理特性を測定することにより、最適な成形条件を調整できる成形条件最適化法を考案した。
- 4) 射出原料の物理量は温度が可塑化領域の場合、粉末の粒度によって影響を受け、それより低温の領域では結合材の物理特性が射出原料全体の物理量に対し支配的であることが分かった。

文献

- 1) 素形材センター."素形材年鑑".東京,素形材センター,平成6年版,p121(1995)
- 2) M. T. Martyn&P. J. James."The Processing of Hardmetal Components by Powder Injection Molding". Int J Refract Met&Hard Mater. 12(2),p.61-69(1994)
- 3) K. F. Hens&D. Lee."INJECTION MOLDING OF POWDERS INTO COMPLEX SHAPE". Adv Powder Metall.vol3,p.283-298(1990)
- 4) 上村誠."結合材添加量による焼結材料の特性変化"熊本,本紙,1995.p.27-32
- 5) 田中逸郎,"金属粉末射出成形品の製造方法".東京,公開特許公報.平3-299802(1991)
- 6) 齊藤勝義ら監修."金属粉末の射出成形技術".東京,(株)総合技術センター,p85(1988)
- 7) (株)三菱重工業射出成形機事業部監修."成形技術講座成形コーステキスト".名古屋,(株)三菱重工業.1995.p.9-24

品質管理のためのBASICプログラム「品質管理オタスケ君」の開発

富重定三*

Development of a BASIC Program for Statistical Quality Control

Sadami TOMISHIGE*

中小零細企業の工場における品質管理活動の合理化及び省力化を目的に、品質管理手法であるヒストグラムや管理図などをパソコン処理するためBASICによるソフト開発を行った。

その特徴はパソコンを使ったことのない生産現場の作業者が使うことを前提に、パソコンをあたかも電卓のように使用することである。メインメニュー及びサブメニューにより処理する品質管理手法を選択し、画面の指示に従って初期条件とデータを入力すれば計算結果及びグラフなどが出力するものである。

処理可能な品質管理手法は①ヒストグラム、②散布図と相関係数、③回帰直線、④管理図（ \bar{X} -R管理図、 \bar{X} 管理図、pn管理図）、⑤パレート分析、⑥直交表（L18、L9、L8、L12）による分散分析である。

このソフトを使用することにより品質管理活動のうちルーチンワーク的な統計処理作業が省力化でき品質管理活動の効率化が期待できる。

1. はじめに

平成7年に施行された製造物責任法いわゆるPL法によって、企業は自社製品にたいする賠償責任が強化されたことや、アジア諸国をはじめとした発展途上国の技術力の向上による国内生産から海外生産へのシフトに伴う企業間競争の激化などにより、品質及び生産性の向上がより一層求められるようになってきた。しかしながら、中小零細企業においては、このような生産体制の急激な質的变化が求められているにもかかわらず、従業者の高齢化や人件費削減などによって生産管理や品質管理の円滑な運営が思うにまかせない状況になっている。せめて品質管理活動におけるルーチンワーク的な作業である統計手法によるデータ処理について、合理化すれば品質活動が少しは容易になる。このような目的からパソコン用品質管理ソフトを開発したので、その概要について説明する。

2. 品質管理活動におけるパソコン化の必要性

品質管理は「買い手の要求に合った品質の製品を経済的に作り出すための手段の体系である。」¹⁾と定義され、その活動範囲は工場のあらゆる面に及んでいる。図1はある工場の品質管理活動の流れをモデル的に示したものである。①～⑤は生産活動そのものであるが、⑥以下は

*生産技術部

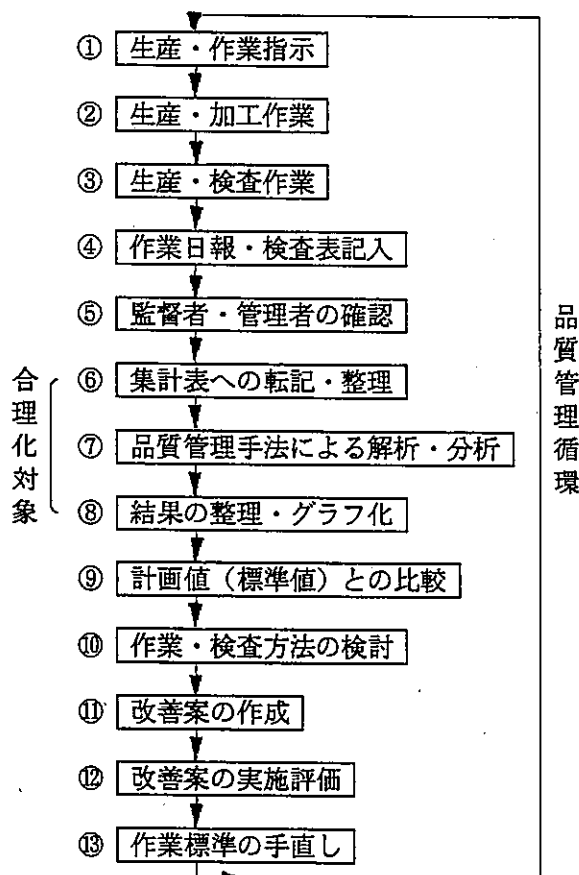


図1 品質管理活動の流れ

直接的生産活動ではないが、生産活動をアシストする活動であり、生産効率や品質向上に寄与する活動で品質管理の主体的活動である。

ところが中小零細企業においては、必ずしもこのよう

な品質管理活動が円滑に運営されていない。理由として(1)品質管理・生産管理専門の技術者がいない。(2)管理者・監督者が品質管理に関心がない。(3)品質管理手法を知らない。(4)データを整理解析する時間がない。などが挙げられている。事実、よく工場で見受けられるのが、検査や作業日報などを記録しながら、そのデータを整理や分析しないでただ保存するというものである。

本来、検査や作業報告は結果を知るといだけでなく、その情報を次の生産活動に活用して、生産性の向上や品質の安定などに利用することが重要である。このような観点から、品質管理活動は「工場における日々の生産活動で得られるデータを、品質あるいは生産性の向上に役立つ情報に加工する活動である。」と表現でき、近代的品質管理が統計的品質管理(Statistical Quality Control: SQC)と呼ばれるゆえんでもある。

特に、図1の⑥～⑧はデータ処理が主体の活動であり、ここで用いられる手法が、俗に品質管理の七つ道具(人によっては若干の違いはあるが)と呼ばれる統計的手法である。せめてデータ処理の定石である品質管理手法すなわち(1)チェックシート、(2)ヒストグラム、(3)パレート図、(4)特性要因図、(5)層別、(6)散布図(相関図)、(7)管理図、などはパソコンによる処理によって、前述した中小零細企業に見られる品質管理活動の阻害原因について、少しは除去できるものと考えられる。

3. 品質管理オタスケ君の開発

3.1 開発方針

現在市販されている品質管理用パソコンソフトはかなりの数があるが、必ずしも中小零細企業において導入されていない。その原因として(1)価格が高い。(2)汎用性が高いため使い勝手が悪い。(3)使いこなすためにはパソコンのOSの知識が必要である。(4)処理結果を機械や装置の制御に利用できない。などさまざまな理由が考えられる。

以上を踏まえ開発するパソコンソフトの基本方針を次のようにした。

- 1) パソコンを電卓代わりに使う。
- 2) 生産現場の作業者が直接データを入力する。
- 3) そのためには操作が簡単である。
- 4) 計算結果が一目で理解できるよう図表化する。
- 5) 品質管理で使われる手法を網羅する。

現在パソコンがかなり普及したとはいえ、中小零細企業に多い高齢層の従業員にとって、パソコンの使用はかなり抵抗があるものと考えられ、これが品質管理活動をパソコン化する場合の最大の障害となっている。そこで操作にあたっては、作業者がパソコン特有の命令語を使ったり、プログラムファイルを操作しなくて済むよう

にし、パソコンアレルギーを除くよう努める。

方針1)については、可能な限りデータだけを入力すれば計算結果が得られるようにする。2)、3)についてはほとんどの操作をテンキーボードの操作だけでできるようにする。また、画面上に適宜説明を加え、他の説明書などを読まなくても操作できるようにする。4)については可能な限りグラフ化する。5)については前述の品質管理の七つ道具うち計算処理主体のヒストグラム、散布図、相関係数、回帰分析、管理図、パレート図を可能な限り処理できるようにする。

3.2 品質管理オタスケ君の概要

対応するパソコンはNEC PC-9800シリーズ、98NOTEでの動作が可能であり、利用環境はRAM容量640Kbytes、1つのフロッピードライブ装置(5inchもしくは3.5inchの2HDタイプ)のみ使用、ディスプレイは高解像(640×400dot)カラーもしくはモノクロがあれば使用できる。

供給媒体は5インチもしくは3.5インチ2HDフロッピーディスクである。

使用したソフトウェア開発ツールはNEC N88-日本語BASIC(MS-DOS版)Ver. 6.2である。当初はロータス123かエクセルなどの計算用スプレッドシートのマクロ機能によるプログラム化を検討したが、前項の開発方針の操作性やプログラムの自由度、あるいは計算結果を機械制御に利用することを考慮し、ソフトウェア開発専用言語であるBASICを採用した。

処理できる品質管理手法は①ヒストグラム、②散布図と相関係数、③回帰直線、④管理図(Xbar-R管理図、X管理図、pn管理図)、⑤パレート分析、⑥直交表による分散分析(L18、L9、L8、L12)である。直交表による分散分析以外は品質管理として使用頻度が高い手法である。しかも管理図は多種類ある管理図のうち最も使われる可能性が高い3種を選別できるようにした。

直交表による分散分析は、より高度の品質管理や生産管理を行うのに工場実験が必要になること、また、品質工学などの新しい概念²⁾が生産現場に応用されることも予想されることから加えた。

プログラムを利用するためには、MS-DOSとN88BASICが入ったフロッピーディスクに「品質管理オタスケ君」プログラムと「AUTOEXEC.BAT」ファイルをコピーするだけである。次回からは、このフロッピーディスクをドライブに差し入れるだけで「品質管理オタスケ君」が何の操作も必要なく立ち上がる。このようにすることでパソコン特有の立ち上げ時のファイル操作が省略でき、パソコン未経験者においても抵抗なく電卓感覚で使用できるものと考えている。

図2に開発した品質管理オタスケ君のプログラムの流れを示した。また、図3にそのオープニング画面と図4にメインメニューを示した。

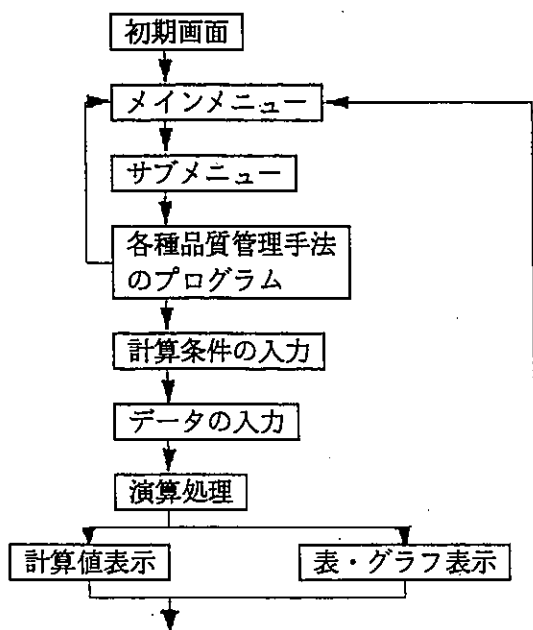


図2 品質管理オタスケ君の流れ

操作方法はメインメニューとサブメニューにおいて必要な品質管理手法の番号を選択することにより、処理プログラムにアクセスできるようにした。このとき画面には入力方法の説明が表示され、操作の利便性を与えている。

データの入力方法は画面に表示される指示に従って、初期条件（データの数、名前、種類など）を入力し、その後数値データを画面のデータ番号に従って入力する。入力ミスした場合は画面の指示に従って、正しいデータを入力する機能も付加している。計算結果の出力方法は、必ずデータ入力後に画面上で指示される。

出力メニューに従って番号を入力すれば、集計表、グラフを個別に出力できる。また、これらの結果は何回も出力できるようになっている。計算処理を終了すると、必ず最初のメインメニューが表示され、次の品質管理手法が続けて処理できるようになっている。プログラムの終了はメインメニューの終了を選択すると図3のオープニング画面が表示される。

これが基本的な入力方法であるが、品質管理手法によっては若干入力方法が異なることがある。この場合、次の各手法の項で説明をする。

3.2.1 ヒストグラム

ヒストグラムは製品のばらつきを調べたり、各製造工程の工程能力把握、あるいは製品規格値や標準値との比較などに用いられ、品質管理にはなくてはならない手法である。しかし、これを手作業で求めるとなるとかなり時間がかかり、品質管理活動に支障をきたす恐れが生じる。

メインメニューからヒストグラムを選択すると初期条件入力画面になる。データ入力は画面の指示に従って数

値をキーインする。データ数は無制限であるが、実際は100ぐらいまでがグラフの見よさからから適当である。

データ入力を終えるとデータの最大値、最小値の表示があり、グラフの表示範囲の設定を行う。グラフ表示の最小値とクラス分けの範囲を入力するとヒストグラム表が表示され、クラス分けされた範囲と度数などの処理結果³⁾が出力される。更に、リターンキーを押すとヒストグラムが出力される。図5にその1例を示す。

3.2.2 散布図と相関係数

散布図は相互に関連ある2つの原因によって得られるデータについて、グラフにプロットしてその関係を調べる手法である。例えば、加工条件と製品寸法、消費原料と製品重量、鋼の中の炭素量と硬度などの関連を調べるのに適している。

相関係数はこれら2者の関係の強弱を数値的に表現したもので、両者とも品質管理においてよく用いられる手法である。

メインメニューから散布図と相関係数を選択し、初期条件としてX軸及びY軸の名称を入力する。この場合漢字入力も可能である。次にデータ数を入力し、画面上に表示されるデータ番号に従って、X値とY値を「,」をはさんで入力する。最後のデータを入力すると、画面最下行に次画面へ進むコメントが現れる。リターンキーを押すと入力したデータの一覧表が出力される。これによってデータの確認をして、画面上の指示に従って再度リターンキーを押すと処理結果（散布図と相関係数の表示）が出力される。

図6にその1例を示す。画面の右側に散布図を、左側に相関係数を表示する。

3.2.3 回帰と分布図

回帰とは、変数Xと変数Yとが原因と結果の関係にあることを意味し、XとYとの間に直線的な関係が成り立つ場合、回帰関係があるといい、その直線的な関係を回帰直線という。概念的には前項の相関係数の延長線上にある品質管理手法である。プログラムの解法においても、前項の相関係数のプログラムとかなりの部分兼用できる。グラフの表示においてもほぼ同じであり、違うのは回帰直線の表示だけである。

品質管理においては若干高等な手法であり、人によっては回帰分析は品質管理の七つ道具から省く場合がある。

この手法が使われるのは、前項の相関係数で関係の強さが判断でき、1つの因子が変化するとき、他の因子がどのように変化するか推定するような場合である。例えば、加工条件を変化させたとき製品寸法がどのようになるか知りたいときや、原料の量を増減したとき得られる製品の数量を推定したいときなどである。

メインメニューから回帰と分布図を選択すると、初期条件及びデータの入力になるが、操作は前項の相関係数

とほぼ同じである。最後のデータを入力し終え、指示に従ってリターンキーを押すと、計算結果が出力される。

これには回帰直線式 $Y=a+bX$ と、入力データ及び回帰直線式を当てはめたときのYの推定値が表示される。画面上の指示に従ってグラフ表示を指示すると回帰直線とデータの散布図が出力される。図7にその一例を示す。

3.2.4 管理図

データは必ずばらつきがある。しかし、そのばらつきも管理状態にあるばらつきと外乱要素が入ったときのばらつきに違いが生じる。この性質を利用して管理状態にあるかどうかを簡単に見極める手法が管理図である。管理図は品質管理の発展とともに改良が加えられ、今では品質管理手法の中心的存在となっている。しかし、生産現場で描くにはかなりの負担が強られる。特に、工程管理を行うには必要に応じてサンプリングを行い、データを管理図に書き込み工程状態を調べるが、このとき計算や作図に時間をかけることができない。管理図はリアルタイムに描き、利用してこそ利用価値がある。このようなきパソコン化が真価を発揮する。

今日では、データの性質により多様な管理図が開発されているが、このソフトには \bar{X} -R管理図、 \bar{X} 管理図、 pn 管理図の3種類がサブメニューから選択できる。

ここでは \bar{X} -R管理図について、操作の概要を説明する。メインメニューから管理図を選択すると、サブメニューが表示され、前述の3種の管理図が選択できる。希望する管理図番号を入力すると、処理メニューが表示されデータ入力、データシートの表示、グラフの表示が選択可能となる。データ入力番号を入力すると初期条件入力画面が表示され、データ数、組数を入力する。次に画面上にデータ番号が表示され、番号に従ってデータを入力する。データの最後になると画面最下行に処理メニューへ行く注書が現れ、リターンキーを押すと処理メニューが表示される。データシート表示を選択すると、組毎に入力したデータとその合計、平均値、範囲が出力され、画面の下方に \bar{X} の管理限界及びRの管理限界の計算値が表示される。リターンキーを押すと処理メニューが現れ、グラフ表示を選択すると一般に見られる \bar{X} -R管理図が出力される。図8にその一例を示す。一度データを入力すると何回でもデータシート及び管理図のグラフを表示することができる。

3.2.5 パレト分析

工程における不良原因は限りなく存在するが、実際にはいくつかのごく少数の原因によって不良を出していることが多い。従って、この少数の原因について対策を取れば、不良のほとんどが解決することになる。このように品質に影響を与えている原因を探し出すための手法としてパレト分析がある。このほかに無数にある商品を管理するのに商品別売り上げ額をパレト分析し、売れ

筋商品の重点管理や、顧客管理にも利用できる。また、生産工場における資材管理や在庫管理などにも利用でき、その適用範囲は広い。

メインメニューからパレト分析を選択するとデータ入力画面に切り替わる。データ番号が表示され、項目名を入力するが、このとき漢字の入力も可能である。次に件数などの数値データを入力すると、データ確認の意味から入力したデータが正しいときは「0」を、間違えて入力し、修正の必要があるときは「1」を入力するようコメントが表示される。0を入力するとデータ番号が進み、1を入力するとデータ番号が戻り、再度データを入力し直すことができる。データ入力画面には注意書きによって、「999」を入力すると入力画面が終了することを表示する。999を入力すると再度データの確認のため、データが正しいときは「Y」、再入力の場合「N」を入力する。Yを入力すると演算処理に進み、Nを入力すると最初からデータを入力し直すことができる。

Yを入力すると画面上にパレト分析表の表示の許可のコメントが表示される。指示に従ってリターンキーを押すとパレト分析表が出力される。パレト分析表には度数の大きい順にソートされた項目名、度数、百分率、累積百分率、ランクが表示される。ランクはAが累積百分率70%以内の項目に、Bは95%以内の項目に、Cはそれ以外の項目に付けられ、重要さの目安を与える⁹⁾。ここでリターンキーを押すとパレト図が出力される。

図9にその例を示す。項目数は無制限に入力することができるが、画面の見やすさから25以内が適当である。

続けてリターンキーを押すと処理メニューが現れ、パレト分析表、パレト図及びメインメニューを選択できる。

3.2.6 直交表による分散分析

品質管理や生産管理のため、特性と要因の関係を知らずに10~20因子というような多数の因子を同時に取りあげて実験する必要に迫られることが多い。これを各因子2~3水準にとどめるにしても、その組み合わせは膨大な数にのぼり、実験するには時間やコスト面から難しくなる。これを解決する方法として、一部実施法の一つである直交表による実験がある¹⁰⁾。

直交表は任意の2因子がその水準のすべての組み合わせが同数回ずつ現れるよう割り付けた表であるが、これによる実験の特徴は実験回数が少なくできることや解析、特に要因効果を判定する分散分析が比較的簡単に求めることができることである。このようなことから今日では工場実験(品質工学を含む)や実験計画法の分野で重要な手法となっている。しかし、直交表による分散分析が比較的簡単に計算できるといっても、水準毎の和や2乗和を間違いなく求めることは、かなり手間のかかる作業である。しかも分散分析表まで作成するとなればなおさ



図3 オープニング画面

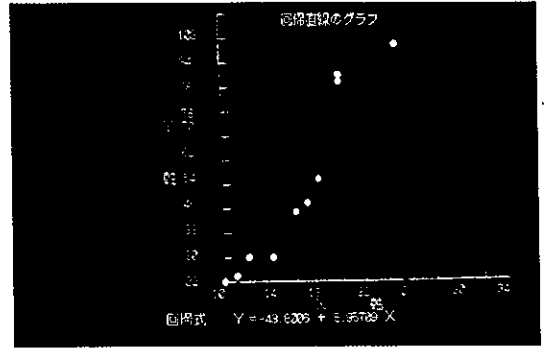


図7 回帰直線と分布の結果例

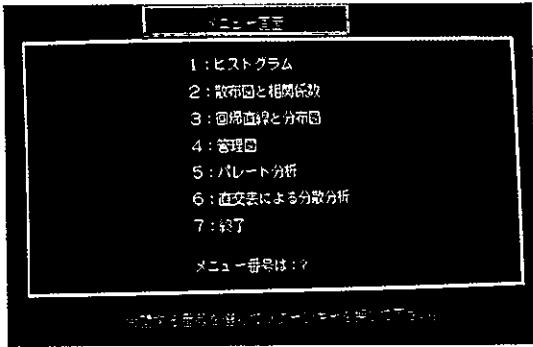


図4 メインメニュー画面

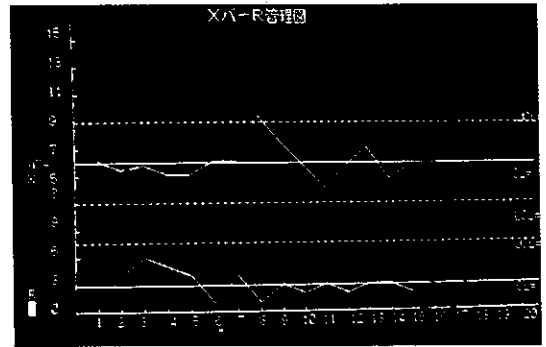


図8 Xバー-R管理図の結果例

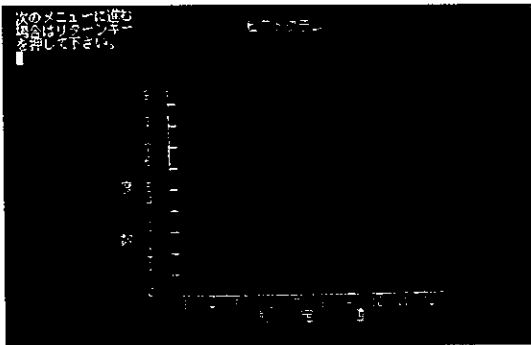


図5 ヒストグラムの結果例

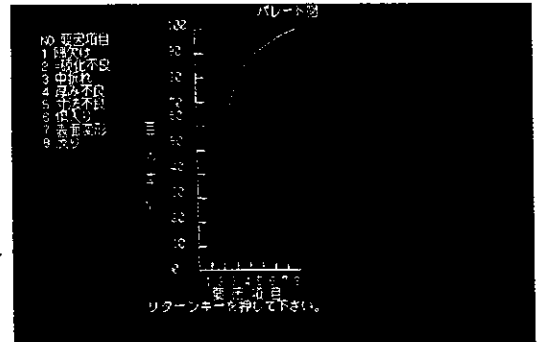


図9 パレート分析の結果例

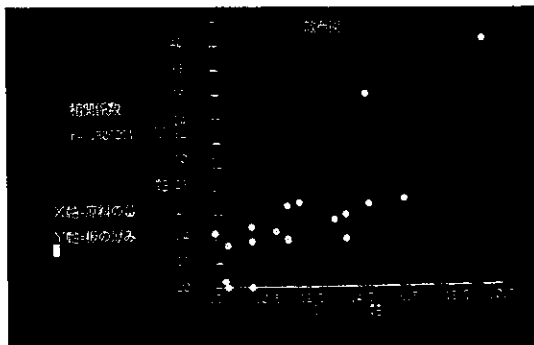


図6 散布図と相関係数の結果例

.....L18の分散分析表.....

因子	平方和	自由度	F値	P値
1	11.0000	1	11.0000	0.0001
2	1.0000	1	1.0000	0.3173
3	0.5000	1	0.5000	0.4793
4	0.5000	1	0.5000	0.4793
5	0.5000	1	0.5000	0.4793
6	0.5000	1	0.5000	0.4793
7	0.5000	1	0.5000	0.4793
8	0.5000	1	0.5000	0.4793
9	0.5000	1	0.5000	0.4793
10	0.5000	1	0.5000	0.4793
11	0.5000	1	0.5000	0.4793
12	0.5000	1	0.5000	0.4793
13	0.5000	1	0.5000	0.4793
14	0.5000	1	0.5000	0.4793
15	0.5000	1	0.5000	0.4793
16	0.5000	1	0.5000	0.4793
17	0.5000	1	0.5000	0.4793
18	0.5000	1	0.5000	0.4793
合計	18.0000	17		

次のメニューに進みます。

図10 直交表L18による分散分析の結果例

らである。ここにパソコン化の利点がある。

メインメニューから直交表を選択するとサブメニューが表示され、直交表L18 ($2^1 \times 3^2$)、L9 (3^4)、L8 (2^7)、L12 (2^{11})を選択できる。これらの直交表はいずれもよく使用されるが、特にL18は3水準間の交互作用が3列以下に少しずつ部分的に交絡することから、主効果のみ問題にする分析に向き、品質工学においてはよく用いられる直交表である⁷⁾。

希望する直交表を選択するとデータ入力画面になる。最初に、画面の指示に従って繰り返し数を入力する。直交表の実験の場合、繰り返しを行うことは少ないかもしれないが、時系列的な変化を調べるときには、繰り返しによる実験が必要なことから、繰り返しの効果も解析できるようにしている。

データの入りは画面に表示されるデータ番号に従って入力する。最後のデータを入力すると、各要因の水準毎の和と平均値が画面に出力される。続けてリターンキーを押すと各要因毎の偏差平方和、2乗和、修正項(CF)が出力される。リターンキーを押すと最終結果である分散分析表が出力される。図10にその一例を示す。

4. おわりに

このパソコンソフト「品質管理オタスケ君」の開発は、著者が県下の企業から受けた技術相談あるいは工場調査などの経験から、このような計算ソフトがあったら便利だろうなという思いから開発したものである。本来パソコンソフト開発には素人であるので、プログラ的にはずいぶん無駄な部分があるかもしれない。また、このソフトは当然ながら、完成したものではない。これから企業の方に使っていただき、使い勝手の改良や、バグ取りもしなければならない。いずれにしても、このソフトの

評価には時間が必要になる。ここでは、このソフトを使用したとき予想される一般的な利点をあげる。

- 1) 品質管理手法の知識がなくても簡単に計算結果が得られる。
- 2) データ処理の省力化が図れ、処理結果の検討に時間を振り向けることができる。
- 3) 処理した情報を必要なときいつでも生産工程にフィードバックでき、品質管理の効率を上げることができる。

最後に、このソフトを開発するのに企業の品質管理担当者をはじめ多方面の皆様から親切なるアドバイスをいただきました。ここにお礼を申し上げます。

文 献

- 1) 並木高矢、遠藤健児. “生産工学用語辞典”. 品質管理. 東京、日刊工業新聞社、1989. p. 226
- 2) 矢野宏編著 “加工品質工学—生産技術の最適化—”. 切削加工の最適化. ワイヤ放電加工の最適化. 東京、工業調査会、1994. p. 49~62、115~122
- 3) 坂本碩也 “エンジニアのためのBASIC入門”. 品質管理(図形処理). 東京、理工学社、1993. p. 139~169
- 4) 日本経営工学編 “経営工学便覧”. 管理図. 東京、丸善、1975. p. 294~304
- 5) 関根憲一、岩崎澄男 “パソコン活用マニュアル—工場効率化編—”. 現場のムダとり診断. 東京、新技術開発センター、1988. p. 197~223
- 6) 近藤良夫、船阪渡 編 “技術者のための統計的方法”. 直交表による実験の計画と解析. 東京、共立出版、1967. p. 302~321
- 7) 田口玄一 “直交表と線点図”. 3 “Series. 東京、丸善、1971. p. 36~37

データ・ロガーの電磁波ノイズとその防止対策技術

—電磁ノイズ環境における電子機器の性能向上に関する研究—

上田直行*・北村智行**・松原和哉**

Electromagnetic Wave Noise from Data Loggers and Technology
for Prevention of Electromagnetic Interference-Study on Improvement of Electronic Equipment Performance
under Electromagnetic Noise.-

Naoyuki UEDA*, Tomoyuki KITAMURA** and Kazuya MATUBARA**

半導体検査装置用データ・ロガーから発生する電磁波ノイズの評価及び防止対策を行うために、当センター設置の簡易電波暗室を使って試験した。その結果、内部回路をケースで覆い、回路及びケース共に第一種接地線に接続したものが、最も電界強度が低い値となった。鉄、アルミ、銅による材料の違いでは、銅板のケースが最もシールド効果が発揮された。また、内部実装方法や遮へい方法を最適に設計・製造することにより、電磁波ノイズ発生のおよそ無い理想的な特性が得られた。データ・ロガーとパソコンを通信ケーブルで接続して、データの授受を行う試験では、ケーブルから発生する放射ノイズが大きな影響をもつことが分かった。通信ケーブルの代わりに、光ケーブルで接続した場合は、光/電気変換器の電気の部分の問題となることが判明した。

1. はじめに

EU (欧州連合:European Union) では、域内の安全規制を統合するために、特定製品に対してCE (ヨーロッパ共同体:Communate Europeene) マーキングちょう付を義務づけている。一方1996年1月1日からEMC (電磁環境的両立性:Electromagnetic Compatibility) 指令が発効され、IEC (国際標準電気会議:International Electrotechnical Commission) 傘下のCISPR (国際無線障害特別委員会:International Special Committee on Radio Interference) 規格と整合したEN (欧州規格:Europaischen Normen) に適合した機器のみが、CEマーキングをちょう付して輸出可能となった。CEマーキングは、このほか1995年発効済みの機械指令、1997年発効予定の低電圧指令の適合をも包含した形で自己宣言しなければならない^{1, 2, 3, 4)}。

県内企業においても、これにターゲットをおいた製品試験や研究開発が昨年より急激に増加しつつあり、EMC試験が可能な当センターの電波暗室の利用が一段と高まっている。

本論文では、このような背景のもとに、株式会社東京カソード研究所試作の半導体検査装置 (BPコントローラ BP:Beam Profile) 用データ・ロガー⁵⁾ から発生する電磁波ノイズの評価試験や対策法について、共同で研究

を行ったので報告する。

2. 測定方法・条件

2.1 測定方法

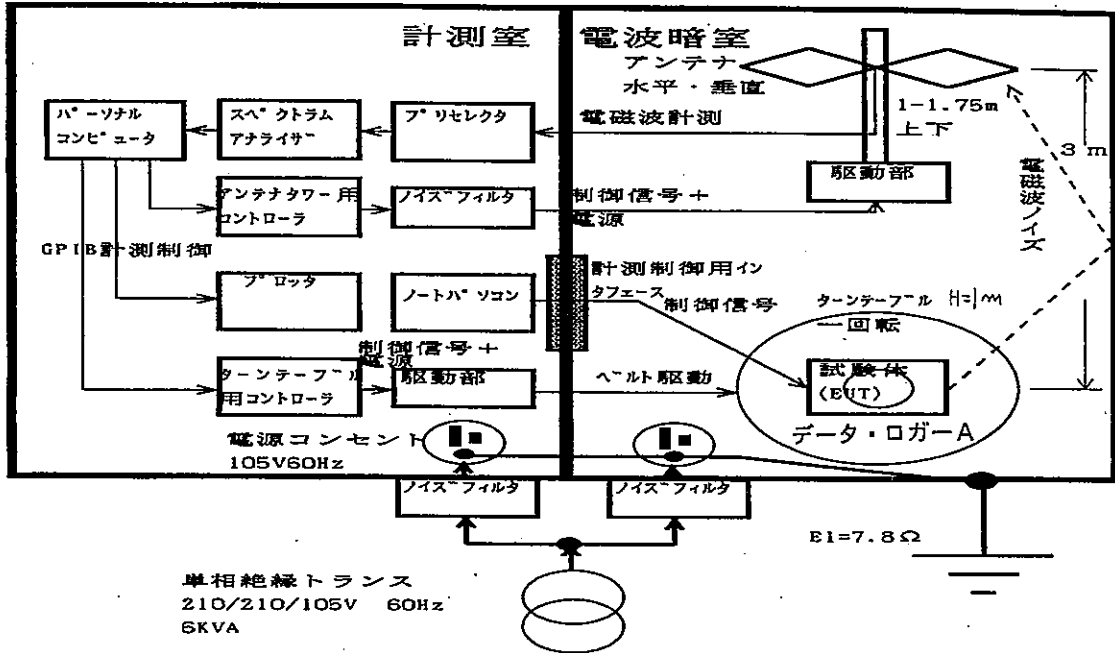
当センターの簡易電波暗室及び計測室を使用した (図1)。

2.2 測定条件

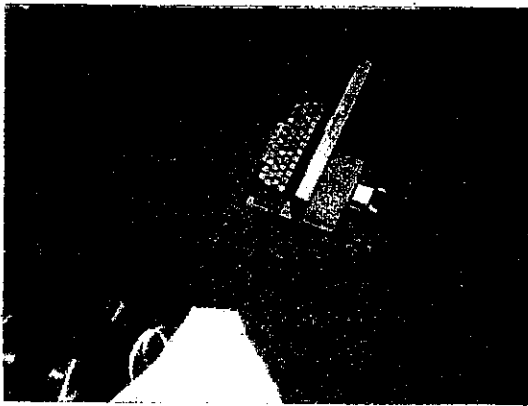
- 1) EUT (試験体) : 開発品データ・ロガー単体 (Z80A 4MHz、コンバータ 142KHz)、開発品データ・ロガーA (データ・ロガーの約13倍の容量をもち、計数回路基板及びこの基板用AC/DCコンバータを追加したもの) 通信ケーブル、光ケーブル (市販品)、光/電気 (O/E) 変換器 2個 (ピーク発光波長=660nm、クロック=約12.3MHz及び300kHz、電源=約100KHzのスイッチング電源)、ノート型パソコン (NEC製98note nx/c i486 SX 33MHz)
- 2) ケースの効果: データ・ロガーのケース (きょう体、エンクロージャともいう) 上部の有り無しの比較測定
- 3) ケースの材料: データ・ロガーについて、下部は鉄板1mm、上部は鉄板1mmまたはアルミ板1.5mmまたは銅板1mmの何れかの組み合わせ試験 (全て市販のはん用品)。データ・ロガーAは、側板がアルミ板1.5mm・3mm 天板・底板が鉄板1mm等で構成。
- 4) アース方法: ①AC/DCコンバータのみのケースへのグラウンド⁶⁾の場合/②全基板のケースへのグラウンドの場合/③ケースを暗室専用第一種接地へ接続した場合

* 電子部

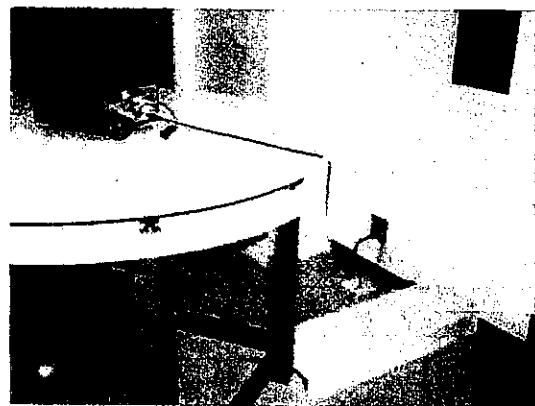
** (株)東京カソード研究所



(a) EMI放射ノイズ試験システム



(b) 計測室側ノートパソコンに接続された光ケーブル



(c) 電波暗室側データ・ロガーAと光ケーブルの設置状態

図1 データ・ロガーAの電磁波ノイズ試験状況

(効果の試験はデータ・ロガーについてのみ実施)
以上2)-4)でのデータ・ロガーは、すべて送受信モード状態で試験する。

- 5) 通信ケーブルを伴う試験：通信ケーブル=RS-232Cケーブル(9600ボー)とデータ・ロガーAまたはパソコンとの接続・未接続、暗室=データ・ロガーAとケーブルとの接続・未接続、計測室=パソコンとケーブルの接続・未接続、信号有り・無し
- 6) 光ファイバケーブルを伴う試験：光ケーブル=RS-232Cのデータ(9600ボー)伝送とデータ・ロガーAまたはパソコンとの接続において信号有り・無しの試験

2.3 評価方法

データ・ロガー単体またはデータ・ロガーと接続されたケーブル+パソコンから発生する電磁波ノイズについて

周波数解析を行い、周波数対電界強度の測定結果について評価した。

- 1) 周波数範囲：30M-1GHz
- 2) 準拠規格：VCCI (情報処理等電波障害自主規制協会)

3. 測定結果及び考察

3.1 ケースのシールド効果

周波数帯域が30M~300MHzでは、上部ケースの無いほうが、鉄板製の全密閉ケースよりも約4dBμV/mほど小さい結果となった。これは、全密閉ケース内の近傍電磁界において、例えば伝搬経路の異なる2つの電磁波がケースで反射して、ある空間で位相差が一致して電界強度を強め合う(電磁波の干渉⁷⁾が発生)機会が増加すること

により、これがそのまま遠方電磁界として3m離れたバイコニカルアンテナに受信されたためと考えられる。上部ケースが無い場合は、少なくとも近傍電磁界での干渉はほとんど発生せず、電波暗室のみの反射・吸収しか無いため、小さくなったと考えられる。

しかし周波数帯域が300M~500MHzでは、逆に全密封ケースが上部ケースの無いほうよりも最高約11dB $\mu V/m$ ほど小さい結果が得られた。一般に鉄板は、銅板やアルミ板と比較して、高周波になるほど反射よりもむしろ吸収によるシールド効果が現れる性質がある^{8, 9, 10)}。従って、この場合は前記の帯域においてケースを形成している鉄板が、電磁波の吸収を行ったために低減したものと考えられる。

ほこりや水蒸気等の付着による絶縁性能の低下や、人体に対する安全性確保を考慮すると、周波数の一部では電磁ノイズ特性が悪化する恐れはあるものの、機器は全てケースで覆ったほうがよいと結論づけられる(図2)。

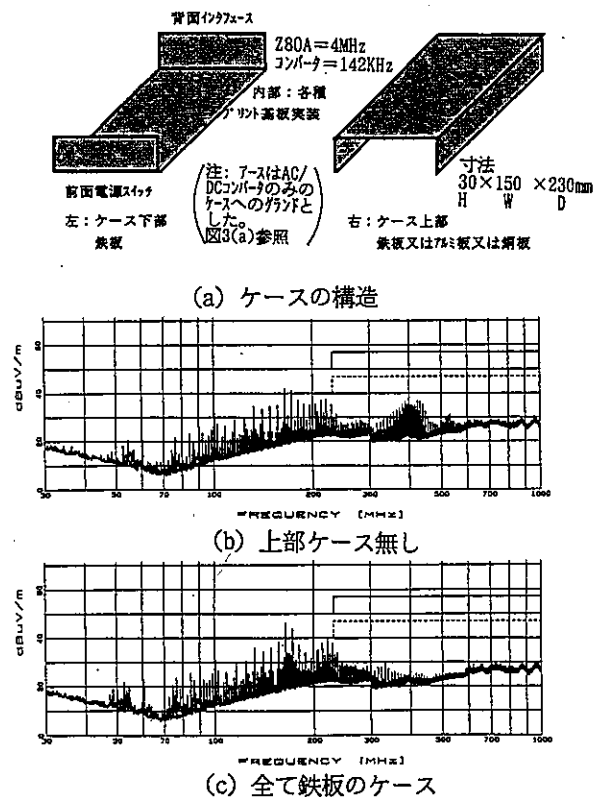


図2 ケースのシールド効果

3.2 ケースのアース効果

2.2 測定条件の4)で述べたように、3種類の方法で最も悪いのは、AC/DCコンバータ基板のみをケースへグランドしたものであった。逆に最も効果があったのは、基板・ケース全てを第一種接地へ接続した時であった。全基板のケースへのグランドは、この中間の結果となった。電界強度のピークを比較すれば、悪いほうから順に約46 dB $\mu V/m$ > 40dB $\mu V/m$ > 38dB $\mu V/m$ であった。周波数帯域でいえば、30M~300MHzで効果があり、300MHz以上はあ

まり効果は無い。結論としては、接地を行ったほうが最もノイズ低減効果があることがわかった。これは、人体に対する安全性についても好ましいことである。ただし、本接地は、電波暗室専用の第一種接地であること、接地線の電圧が、mVオーダーで、データ・ロガーにほとんど重畳しなかったために良い結果をもたらしたものである。しかし、工場内や納入現場等においては、複数の機器のアースが共通になっており、このアースから侵入するノイズの影響を無視できない可能性がある¹¹⁾。このような意味からは、全基板のケースへのグランドのみのほうが、第一種接地からの影響を遮断することができるので、接地するよりもむしろよい方法といえる。また、他の理由としては、逆にデータ・ロガーから接地線へ電磁ノイズが流出して、他の機器に妨害を及ぼす可能性があるため、ケースへのグランドのみのほうがよいことになる(図3)。

3.3 材料の違いによるシールド効果

電界強度の小さいものから順に、銅板>鉄板>アルミ板となった。ピーク値のみをこの順に比較すると、約37 dB $\mu V/m$ > 47dB $\mu V/m$ > 46dB $\mu V/m$ であった。一般に銅板はアルミ板よりややシールド率がよいが、結果的には銅板がピーク値で11dB $\mu V/m$ もの差となった。この原因のひとつは、アルミ板が合金でできており、アルミの純度が低くなった可能性があることである。その結果、反射損及び吸収損のパラメータのひとつである電導率及び透磁率に悪影響を及ぼして、両方の損失が小さくなり、全体としてシールド率が低下したと考えられる^{8, 12)}。

もうひとつの特徴は、300MHz以上のUHF帯においては鉄板の方が、銅板よりシールド効果があったことである。これは、データ・ロガーにおいて、電界よりも磁界発生が顕著に現れ、この磁界を銅板よりも高透磁率を有する鉄板が近傍界で遮へいたために、遠方界地点での電界強度も小さくなったと考えられる^{8, 9, 13, 14)}。なおこの場合、ケース下部を含め3次元的に鉄板全体で磁界を吸収したことによる効果も、大きく寄与したと思われる(図4)。

3.4 通信ケーブルを伴う電磁波ノイズ試験

1)データ・ロガーAのみの場合

データ・ロガーA単独動作時は、全帯域においてバックグラウンドノイズ(暗電磁ノイズ)^{14, 15)}とほぼ等価であった。ここに、バックグラウンドノイズ(暗電磁ノイズ)とは、試験機器を設置しない空の状態の電波暗室、アンテナ、ケーブルによって決まる電磁ノイズと定義する。正確には、バックグラウンドノイズのバイアス分を除去した正味のデータ・ロガーAの電界強度は、最大約

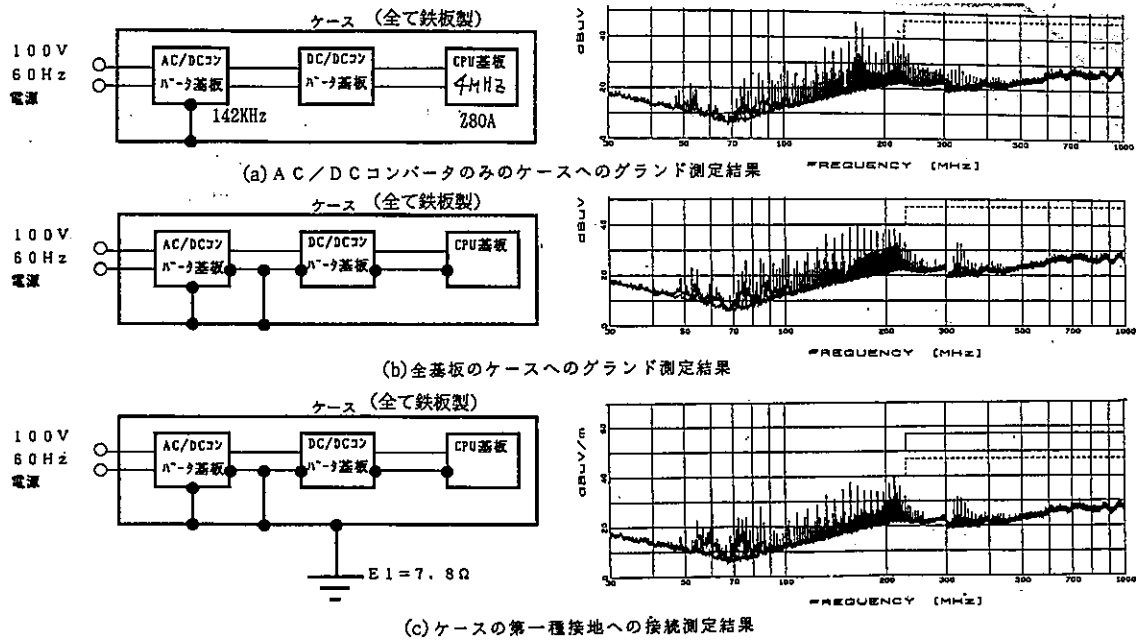


図3 ケースのアース効果

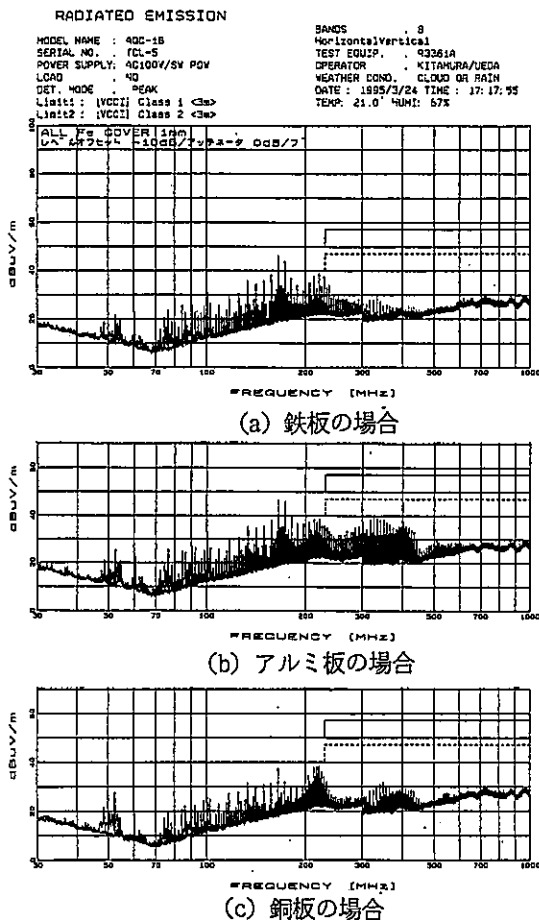


図4 材料の違いによるシールド効果

6 dB μ V/mであり、実用上はほとんどノイズのケースからの電磁波放射は無視してよい値となった(図6(a))。

この効果をもたらした要因は以下のものがあげられる。

- ・鉄板とアルミ板の使用により、効果的な吸収損失、反射損失が得られた。

- ・アルミ板の厚みを増すことで、表皮効果の深さを補う形で吸収損失を増大させることができた。
- ・寸法が200×99×230mmで、適当な直方体であった。すなわち、反射損の場合、遠方界と近傍界では損失値が異なるが、この場合、近傍界での反射損が有効に働いたと思われる⁸⁾。
- ・ケース内部の2枚のアルミ板がシールド材として効果的であった。
- ・基板とシールド板の交互配置、基板の側面への実装等が適切であった。
- ・RS-232C用コネクタ、アナログ入力用コネクタ、電源スイッチ、放熱用換気孔等の取り付け方法や位置、加工が適切であった。

なお、データ・ロガーAは、送受信の動作モードで動いているものの、ケーブルが接続されていないため、その分のノイズ伝搬がないのはいうまでもない。

- ・材料のアルマイト処理、レザートン塗装、メラミン塗装も導電性、絶縁性の点から有効であった¹⁰⁾。
- ・データ・ロガーAのアナロググラウンド及びデジタルグラウンド処理法が有効であった。
- ・短い配線、小さい電流ループ面積、微小誘起電圧、微小電流等の相乗効果により、ノーマル及びコモンモードで発生する電界強度が小さく抑えられた¹¹⁾。
- ・データ・ロガーAの第一種接地への接続が効果的であった(図5)。

2) データ・ロガーAと通信ケーブル接続時の試験

通信ケーブルを電波暗室内に入れた時(図7(a))の方が、計測室へ置いた時(図7(c))よりも、かなり良い結果となった。これは、ケーブルが一種のアンテナとなって、電磁波を放射するため、計測室の方が電波暗室より

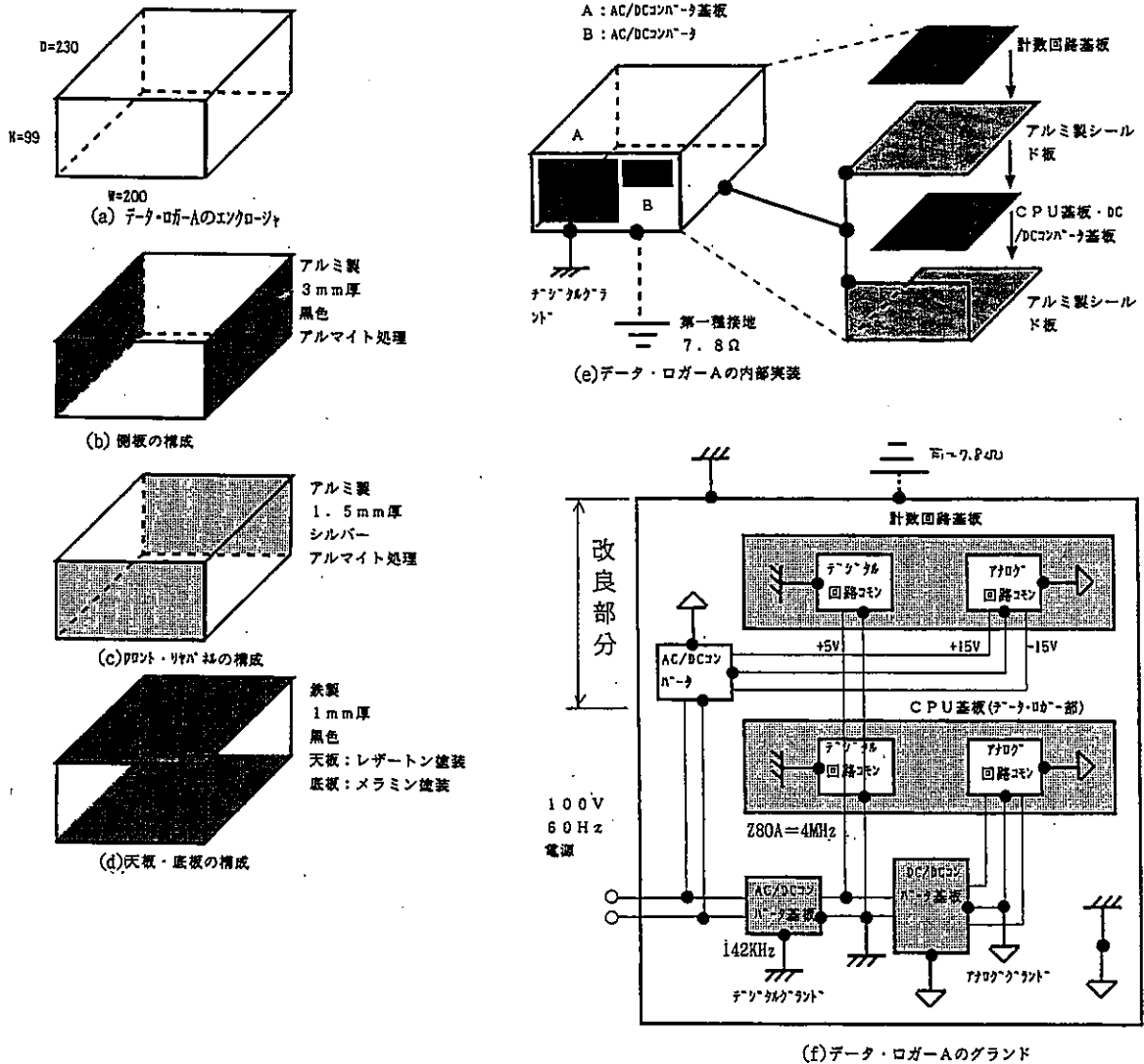


図5 データ・ロガーAの構造

長くなったために、電界強度が多く出たものと考えられる。

しかし、前記1)のデータ・ロガーAのみの場合と同様に、2つとも規格上は問題にならない非常に小さい結果となった。

次に、ケーブルの片端の端末処理方法で、とぐろを巻いた場合(図7(c))が、巻かない場合(図6(d))よりも圧倒的に電磁ノイズが少ないことがわかった。この理由を、ケーブルが一種の送受信アンテナとみなして考察することとする。とぐろを巻くということは、ケーブルを一種のループアンテナ(わく形空中線)と考えることができる。ループアンテナは、一般に受信に用いられることが多く、電磁波の受信によって発生した電圧は、受信電界強度と電圧利得の積で得られる。この電圧利得は、アンテナの巻数に反比例することがわかっている^{18, 19)}。すなわち、巻数が多いほど電圧利得は小さくなり、従って電界強度が一定であれば、電圧は小さくなる。ここで、アンテナの可逆性を利用すれば、送信アンテナとして用いる場合も同様にして、巻数が多いほど、電界強度が小

さくなることになる²⁰⁾。

一方、ケーブルを単に放置した場合は、電磁波が四方八方に放射されるのみで、ループアンテナの理論は成り立たないために、両者の差が出たと考えられる。また、とぐろを巻いた場合でも、暗室の方(図7(a))が計測室(図7(c))より電界強度が小さくなっているのは、暗室の方の巻数が多いことのほかに、暗室は6面フェライトをはっているため吸収効果が多いのに対して、計測室はシールドルームの機能しかないために、ここでの電磁波放射が乱反射されて暗室側にバックして多めに出了と考えられる。

3) データ・ロガーAとパソコンを通信ケーブルで接続した場合

最大電界強度約45dB μ V/mで、前記1)、2)とは明らかに異なる結果となった。これは、RS-232Cによる信号の有り(図6(b))無し(図6(c))に係わらず、周波数と電界強度のパターンがほぼ同じ結果となった。また、通常の動作すなわち信号の授受の状態で、ケーブルのアースを暗室でとった場合(図6(b))も、計測室でとった場合

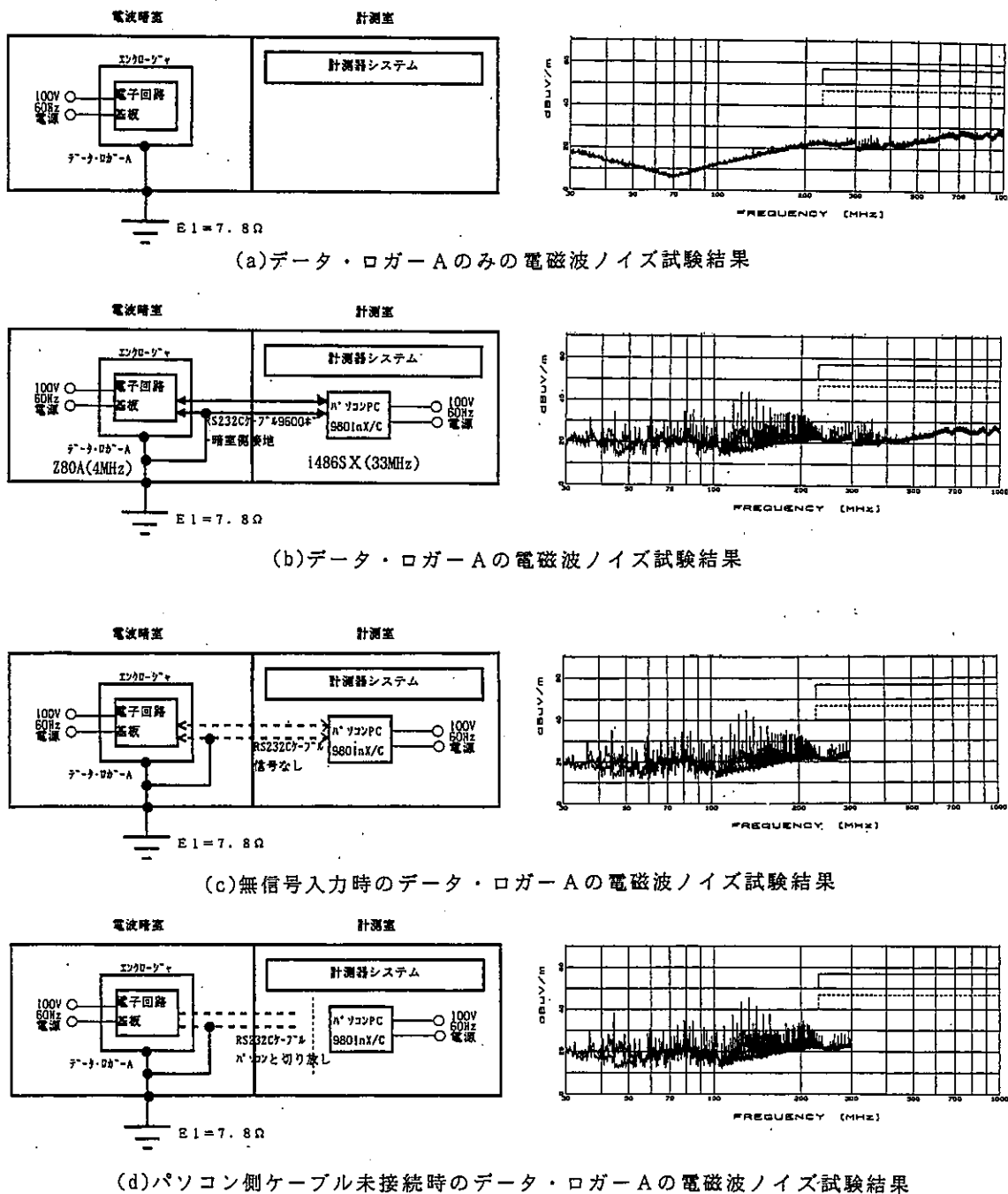


図6 通信ケーブルを伴うデータ・ロガー A の試験 (1)

(図7(b)) もほぼ同様であった。しかし、通常の動作すなわち信号の授受の状態、パソコンとケーブルを切り放した場合 (図6(d)) は、パターンは似ているが、45MHz 付近や180-190MHz 付近の電界強度が5dB μ V/m 程度異なっていた。このことから、本試験の場合は、データ・ロガー A のクロック周波数4MHz の高調波の影響が多であったことは言うまでもないが、パソコン側のクロック周波数33MHz も多少影響を及ぼしていると考えられる。また、伝送レート9600ボーは、今回ほとんど無視してよいと思われるが、スピードがもっと速くなった場合は、ノイズ伝搬の影響を考慮しなければならなくなる。もっとも、この伝送速度は、データ・ロガー A 及びパソコン

の基本周波数に同期して動作しているので、両者の高調波と伝送速度との兼ね合いで、電磁波ノイズの伝搬は決定されることになる。また、RS232C ケーブル内は、送信データ用や制御信号用の電線がお互いに非同期で、データ・ロガー A とパソコン間を転送しあっているため、タイミング上はランダムな電磁波放射となっていると考えられる。このことは、電磁波ノイズ試験の再現性を困難にする要因となる。

データ・ロガー A の電磁波ノイズ発生源は、電界源と磁界源の2種類があるように、ケーブルにもこの2種類の他に、コモンモードとノーマルモード、同軸ケーブル単体 (今回は対象外) と複導体ケーブル、ケーブル内部

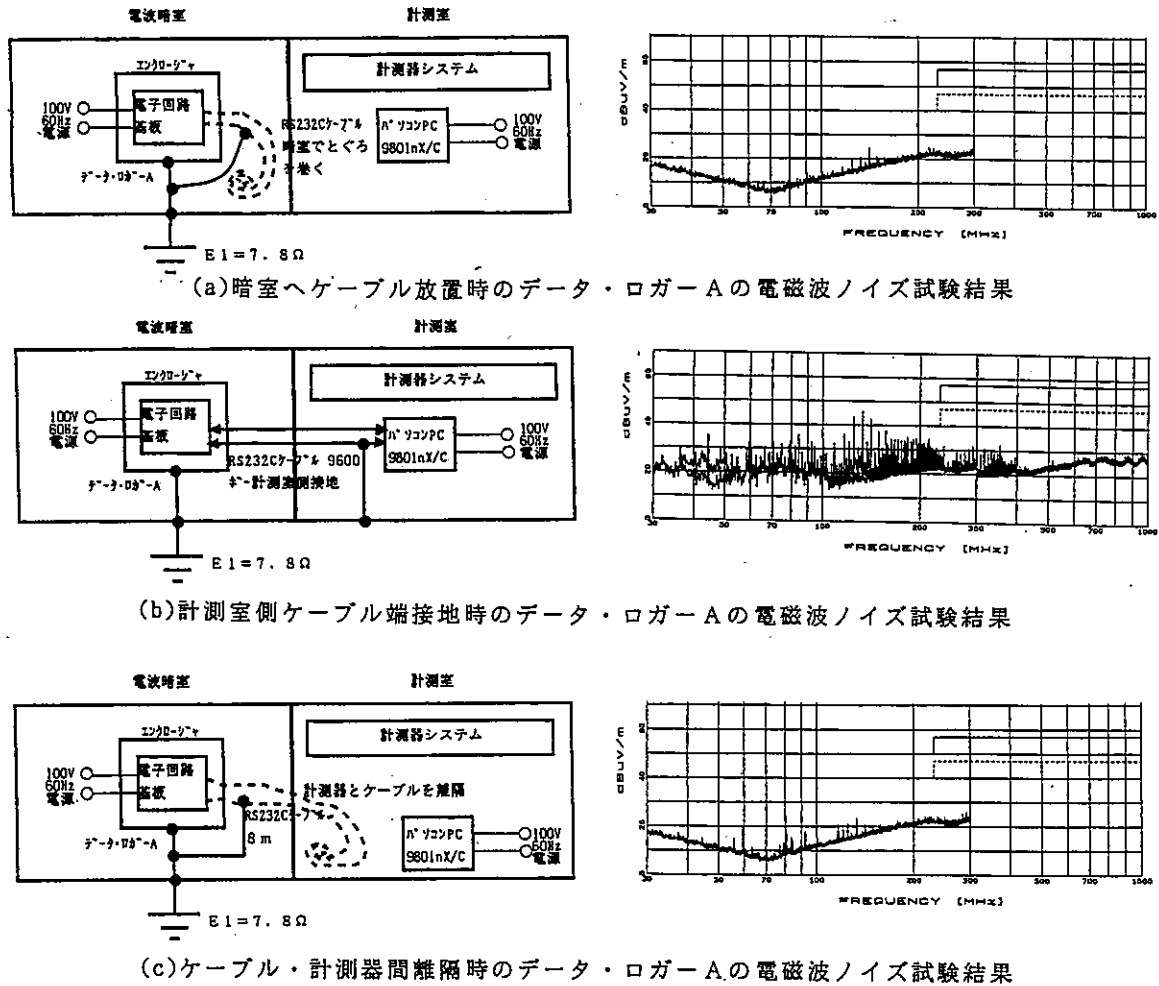


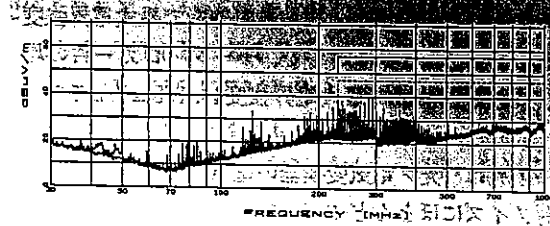
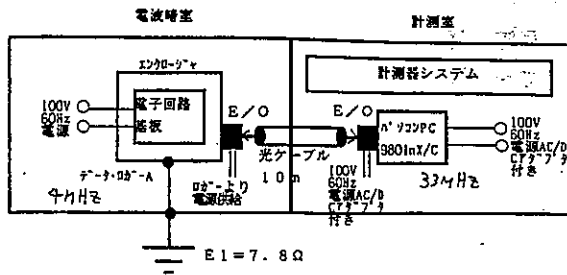
図7 通信ケーブルを伴うデータ・ロガーAの試験 (2)

の直線状電流と円形渦電流等の要素が複雑にからんで²¹⁾、しかも時間の要素が加わって、再現性を困難にする要因となっているが、今回は比較的システムがシンプルだったため、ほぼ同様な結果が得られた (図6, 7)。

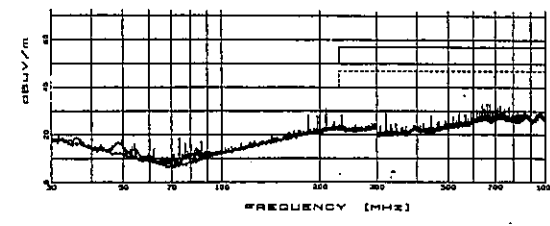
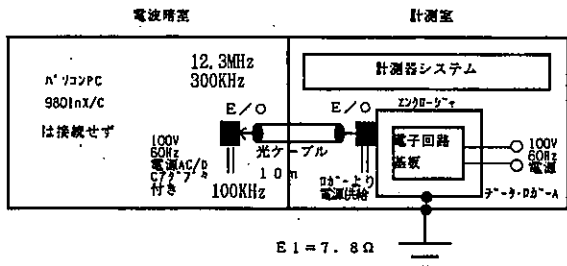
3.5 光ケーブルを伴う電磁波ノイズ試験

3.4で述べた通信ケーブルを光ケーブルで置き換えた試験、すなわちデータ・ロガーA ↔ 光ケーブル ↔ ノート型パソコンのデータ転送試験に関して、データ転送有り (図8(a)) の場合が、無い (図8(c)) 場合よりも電界強度が約3dB $\mu\text{V}/\text{m}$ 多く出た。また、両者の周波数と電界強度のパターンは、ほぼ一致した。一方、E/O変換器と光ケーブルのみの影響を調べるために、逆に計測室へ設置したデータ・ロガーA + E/O変換器と、電波暗室側へ設置したパソコン側のE/O変換器 (パソコンは未接続) 間に光ケーブルを接続して、データ・ロガーAからデータの送受信を行う試験では (図8(b))、電界強度の正味の値は、最大約10dB $\mu\text{V}/\text{m}$ で、周波数スペクトラムもまばらであった。また通常データ転送有りよりも約8dB $\mu\text{V}/\text{m}$ 低い値であった。一般に光ケーブルに使われる

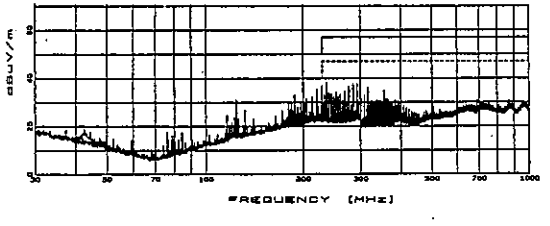
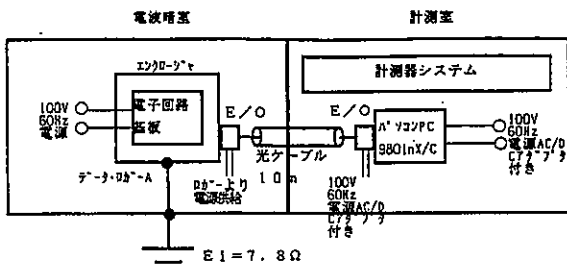
波長は、発光源である半導体レーザーの発振特性から、 μm オーダーの近赤外線領域0.7~2 μm すなわち周波数でいえば 10^{14} Hz付近であり、電磁ノイズで問題としているマイクロ波領域 10^9 ~ 10^{12} Hz付近よりもっと高い周波数が使われている^{22, 23)}。今回は、ピーク発光波長が660nmすなわち約 4.5×10^{14} Hzの周波数が使用されている。この波長の光が、光有り無しの9600ボー伝送レートにてデジタル信号に従って直列転送される²⁴⁾。厳密には、約 4.5×10^{14} Hzの光が連続ではなく、バースト的に発光することになる。従って、光ケーブルからの当該周波数帯域における影響は完全に無視してよい。すなわち、データ・ロガーAはもちろんであるが、E/O変換器の電気部分 (電源、内部電子回路) から発生する電磁ノイズが、問題となる。従って、データ・ロガーAのみならず、このE/O変換器の部分の電磁ノイズ対策を行う必要がある。今回使用のE/O変換器は、市販品であり、特に電磁ノイズ対策は施されていないので、もし問題となる場合は、別途放射ノイズに対してはシールド材で覆うとか、伝導ノイズに対しては絶縁トランスやノイズフィルタ、吸収クランプ (フェライト使用) 等でノイズを減衰させる等



(a)データ転送時の光ケーブルを使ったデータ・ロガー-Aの電磁波ノイズ試験結果



(b)パソコン側E/O変換器動作のみのデータ・ロガー-A転送時の電磁波ノイズ試験結果



(c)データ転送なしの場合のデータ・ロガー-Aの電磁波ノイズ試験結果

図8 光ケーブルを伴うデータ・ロガー-Aの試験

が考えられる。特に、吸収クランプの使用は、放射ノイズのみならず伝導ノイズも低減する効果がある。また、商用電源の影響をなくすために、純粋なバッテリーにすれば、電源まわりの電磁ノイズはさらに低減できる²⁵⁾。今回のE/O変換器用電源は、交流の商用電源を経由して、約100kHzのスイッチング電源を使用して直流に変換しているため、特に伝導ノイズとして悪影響を及ぼす恐れがある。また、E/O変換器には、約12.3MHz及び300kHzのクロックが動作しており、主として約12.3MHzがノイズ発生源と断定してよい(図8)。

3.6 データ・ロガーとデータ・ロガー-Aの比較

1)データ・ロガー(図3(c))と通信ケーブル接続時のデータ・ロガー-A(図6(b))との比較

以下の特徴があることがわかった。

- ①周波数対電界強度のパターンがほとんど似ていない。
- ②データ・ロガーの周波数対電界強度のパターンが、バックグラウンドノイズをベースに出ているのに対して、データ・ロガー-Aの周波数対電界強度のパターンは、電磁ノイズが大きく重畳されて、バックグラウンドノイズの判別が付きにくい。

③データ・ロガーの場合、周波数213MHzで最大電界強度39.8dBμV/mであるのに対して、データ・ロガー-Aの場合は、周波数133MHzで最大電界強度43.8dBμV/mであった。

これらの特徴の差異は、データ・ロガー-Aに接続されているRS-232C通信ケーブルが、一種の送信アンテナとして大きく作用するところにあると考えられる。すなわち、通信ケーブルにデジタル信号つまり電流が流れることによって磁界が発生(アンペールの法則)し、その磁界の時間的変化によって電界が発生(ファラデーの電磁誘導の法則)し、電界の時間変化が変位電流すなわち磁界を発生し、というように以後逐次電磁波(平面波)を生成して三次元的に伝搬(マクスウェルの方程式に従う)し、データ・ロガー-Aから3mの距離にあるRF(Radio Frequency:高周波)アンテナに受信される²⁶⁾。

2)データ・ロガー(図3(c))と光ケーブル接続時のデータ・ロガー-A(図8(a))との比較

以下の特徴があることがわかった。

- ①周波数対電界強度のパターンがほとんど似ていない。
- ②両者とも周波数対電界強度のパターンが、バックグラウンドノイズをベースに出ている。

③データ・ロガーの場合、周波数213MHzで最大電界強度39.8dB μ V/mであるのに対して、データ・ロガーAの場合は、周波数284MHzで最大電界強度40.1dB μ V/mであった。

この差異は、光/電気変換器の電気の部分から発生する放射ノイズにほとんど依存していると考えられる。

3)通信ケーブル接続時のデータ・ロガーA (図6(b))と光ケーブル接続時のデータ・ロガーA (図8(a))との比較

通信ケーブルの場合、周波数133MHzで最大電界強度43.8dB μ V/mであり、光ケーブルの場合周波数284MHzで最大電界強度40.1dB μ V/mであった。VCCI規格からすれば、通信ケーブルは規格外であり、光ケーブルは7dB μ V/m余裕がある規格内に収まっている。すなわち、光ケーブルそのものの効果は大きい、光/電気変換器から発生する電磁ノイズに注意する必要がある。

4. おわりに

データ・ロガー+ケーブル(通信または光)+ノート型パソコンで構成されるシステムから発生する電磁波ノイズについて、各種の試験とEMI (Electromagnetic Interference:電磁妨害)対策技術について研究した。その結果を要約すると、以下ようになる。

- ①シールドと安全性の点から、ケースで内部機器全体を覆ったほうがよい。
- ②内部回路・外部ケースは全て同一グランドに落とし、これを第一種接地に接続したほうが、ノイズ低減効果が大きい。但し現場設置の際は、接地線につながる他の機器の影響を十分注意する必要がある。
- ③シールド材料は、特性の良いものから銅板、鉄板、アルミ板の順であった。
- ④今回製造のデータ・ロガー単体では、ほとんど電磁波ノイズが発生しない理想的なものが出来上がった。これは、経験的な各種のノウハウが活かされた結果と考えられる。
- ⑤データ・ロガーA+ケーブル(通信)+ノート型パソコンの試験では、ケーブルが一種のアンテナを形成するために影響が大きく、パソコン側はほとんど関係ない。
- ⑥データ・ロガー+ケーブル(光)+ノート型パソコンの試験では、光ケーブルの効果は絶大であるが、むしろ光/電気変換器の電気の部分から発生するノイズに注意する必要がある。
- ⑦不必要なケーブルは、とぐろを巻くことにより、ノイズの送(受)信を低減できる。

冒頭に述べたCISPR国際規格では、1995年4月米国にて、情報技術装置のイミュニティ(電磁ノイズ耐性)試験草案が審議されたが、これによると、エンクロージャ、信

号線、通信線、交流電源線及び直流電源線の5箇所すべてを試験対象としている⁴⁾。このようなことを考慮すると、今後はむしろ機器の耐性が重要な問題となってくることは明らかである。

今回は、データ・ロガーから発生する放射ノイズについて検討したが、今後はデータ・ロガーの電磁波ノイズ耐性や伝導ノイズ試験などEMC(電磁環境の両立性)としての総合的な観点から研究することとする。

文 献

- 1)日刊工業新聞社. “電子技術”. 東京, 日刊工業新聞社, 1996. Vol. 38. No. 2. p. 25-61.
- 2)日本規格協会. “EMC・ノイズ対策ガイド”. 東京, 日本規格協会, 1996. p. 30-42
- 3)日刊工業新聞社. “CEマーケティングガイドブック”. 東京, 日刊工業新聞社, 1995. p. 1-105.
- 4)電子情報通信学会. “電子情報通信学会誌”. 東京, 電子情報通信学会, 1995. VOL. 78. NO. 9. p. 825-829, 835-838.
- 5)CQ出版社. “トランジスタ技術”. 東京, CQ出版社, 1990. Dec. p. 484-499.
- 6)CQ出版社. “トランジスタ技術”. 東京, CQ出版社, 1995. May. p. 276-284.
- 7)原島 鮮. “改稿 教養物理学”. 東京, 学術図書出版社, 1967. p. 176-187, P. 220-225.
- 8)金本 正 “ノイズ軽減対策の初歩(準静電磁界)1”. 東京, 横河レンタ・リース, 1995. p. 15-31.
- 9)荒木 庸夫. “電磁妨害と防止対策”. 東京, 東京電機大学出版局, 1977. p. 116-161
- 10)清水 康敬. “電磁波の吸収と遮蔽”. 東京, 日経技術図書, 1989. p. 372-376, p. 515-519
- 11)上田 直行. “接地電位および接地電流の波形観測と周波数解析”. 熊本, 本誌, No. 29, 1991. p. 49-59.
- 12)上田 直行. “電波暗室と電磁ノイズ計測システム”. 熊本, 本誌, No. 32, 1994. p. 33-34.
- 13)上田 直行. “試作マイコンボードの近傍電磁界における磁界強度測定”. 熊本, 本誌, No. 33, 1995. p. 33-37.
- 14)上田 直行. “試作マイコンボードの遠方電磁界における電磁波測定”. 熊本, 本誌, No. 33, 1995. p. 8-44.

- 15) IEEE. "ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY". U. S. A, IEEE, 1993. AUGUST. VOL. 35. NO. 3. p. 394-397.
- 16) ELMA Electronic AG. "19"System ELMASET". Switzerland, ELMA Electronic AG, 1996. p. 4. 1-4. 16, p. 5. 32-5. 48.
- 17) 日本規格協会. "EMC・ノイズ対策ガイド". 東京, 日本規格協会, 1993. p. 42-47.
- 18) 谷村 功. "空中線及び電波の伝わり方". 東京, 近代科学社, 1965. p. 162-165.
- 19) 松本 欣二. "電波工学入門". 東京, 朝倉書店, 1992. p. 83-88.
- 20) 雨宮 好文. "現代電磁波工学". 東京, オーム社, 1990. p. 127-173.
- 21) IEEE. "ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY". U. S. A, IEEE, 1993. NOVEMBER. VOL. 35. NO. 4. p. 409-416.
- 22) 副島 俊雄. "光通信のはなし". 東京, 日刊工業新聞社, 1983. p. 26-27.
- 23) 国立天文台. "理化年表". 東京, 丸善, 1990. p. 物106 (526).
- 24) CQ出版社. "トランジスタ技術". 東京, CQ出版社, 1996. June. p. 389.
- 25) IEEE. "ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY". U. S. A, IEEE, 1995. MAY. VOL. 37. NO. 2. p. 167-174.
- 26) 清水 忠雄. "電磁波の物理". 東京, 朝倉書店, 1991. p. 13-21.

高温型木材乾燥機のための自動乾燥制御システムに関する研究

城戸浩一*・中村哲男**・園田増雄**

Study on an Automatic Drying Control System
for the High-Temperature-Type Wood Drier

Koichi KIDO*, Tetsuo NAKAMURA** and Masuo SONODA**

熊本県内のある企業が柱材などのいわゆる構造材を対象とした高温型木材乾燥機を開発した。本研究は、その木材乾燥機のための自動乾燥制御システムの設計に関するものである。

本稿では、高温型木材乾燥機の概要と自動乾燥制御システムを開発するうえでの技術的課題、考案した含水率の測定方法と木材乾燥のための制御方法及び自動乾燥制御システムの概要について述べる。

考案した含水率の測定方法は、乾燥室内の空気を冷却することによって生じた結露水の積算重量から被乾燥材の平均含水率を推定するというものである。また、木材乾燥のための制御方法は、乾燥中の被乾燥材全体の平均的な含水率を測定し、その測定値からKeylweithの提唱した含水率スケジュールを柱材用に一部変更した乾燥スケジュールに基づいて乾燥室内の相対湿度の設定値を計算し、その設定値に一致するように乾燥室内の相対湿度を調節する処理を一定時間毎に繰り返すというものである。

1. はじめに

熊本県内のある企業が柱材などのいわゆる構造材を対象とした高温型木材乾燥機¹⁾と呼ばれる乾燥機を開発した。この乾燥機は、乾燥室内を高温・高湿の状態に保ちながら乾燥室内の空気を結露させることによって木材を乾燥させることが特徴で、従来の蒸気式(IF型)木材乾燥機と比較して割れの発生が少なく、また表面と中心部における含水率差も小さいという長所を持つ²⁾。しかしながら、この乾燥機では、乾燥前の木材の含水率や乾燥中の含水率を考慮せずに乾燥能力を一定にしたまま運転しているため、乾燥むらが発生したり、また、割れや曲がりなどの損傷の発生を抑えるために乾燥能力を小さくした結果、乾燥時間が長くなるという問題が生じている。そのため、木材の乾燥前の含水率や乾燥中の含水率に応じて乾燥能力を自動的に調節することができる自動乾燥制御システムの開発が望まれている。

本研究の目的は、高温型木材乾燥機のための被乾燥材の含水率の測定方法と木材乾燥のための制御方法を考案し、自動乾燥制御システムを設計することである。

本稿では、高温型木材乾燥機の概要と自動乾燥制御システムを開発するうえでの技術的課題、考案した含水率の測定方法と含水率に基づいた木材乾燥のための制御方法及び設計した自動乾燥制御システムの概要について述べる。

なお、本研究は「木材乾燥における温湿度管理の自動

化」(平成3年度～平成5年度)に関する研究において実施したものである。

2. 高温型木材乾燥機の概要と自動乾燥制御システムを開発するうえでの技術的課題

2.1 一般的な木材乾燥機と高温型木材乾燥機の比較

一般に普及している木材乾燥機の例として蒸気式IF型木材乾燥機³⁾が挙げられる。この乾燥機は、乾燥室内の空気を加熱するための蒸気配管、室内空気を循環させるための室内ファン(IF)、室内の湿った空気を室外へ排出させると同時に乾いた外気を室内へ取り入れるための吸排気筒などから構成される。この木材乾燥機の乾燥の仕組みは、乾燥室内の空気を室内ファンで蒸気配管に接触させて加熱し、加熱された空気(熱風)をさん積みされた被乾燥材のすき間を通過させ、その結果湿分が増した熱風をダンパーの開閉によって排気筒から外へ排出すると同時に乾いた外気を吸気筒から室内へ取り入れることによって木材から水分を除去するというものである。

この乾燥機は、乾燥室内の温湿度の制御が難しいため割れや曲がりなどの損傷が発生しやすいことが欠点である。

一方、県内の企業が開発した高温型木材乾燥機は、乾燥室内の空気を加熱するための蒸気配管、乾燥室内の空気を結露させるための冷水配管(結露管と呼ばれる)、室内空気を循環させるための循環ファンなどから構成される。この木材乾燥機の乾燥の仕組みは、乾燥室内の空気を循環ファンで蒸気配管に接触させて加熱し、加熱された空気(熱風)をさん積みされた被乾燥材のすき間を通過させ、その結果湿分が増した熱風を冷水配管に接触させて結露させることによって木材から水分を除去する

* 電子部

** 情報デザイン部

というものである。この乾燥機の特長は、乾燥室内の温度湿度変動が小さいため比較的割れや曲がりなどの損傷の発生が少ないことである。また、欠点は、結露させるための冷却水が大量に必要になることである。

2.2 自動乾燥制御システムを開発するうえでの技術的課題

高温型木材乾燥機のための自動乾燥制御システムを開発するうえでの最大の問題は、乾燥処理中の被乾燥材の含水率を測定するための適当な手段・方法がないことである。

木材の含水率を測定する機器として、含水率計⁹⁾がある(電気抵抗式や高周波式のものがある)。含水率計は、含水率を手軽に測定することができるため製材所等の現場ではよく使われている。しかしながら、含水率計は高含水率領域において測定誤差が大きいくことや測定箇所がサンプル材の特定の位置の表面付近に限定されること、比重の設定の仕方によって測定値が変わることから被乾燥材の含水率を測定する手段としては適当でない。

また、含水率の測定方法として、サンプル材の重量をロードセルを用いてオンラインで測定し、その値から含水率を求めるという方法⁹⁾がある。この方法では、乾燥前にサンプル材の初期含水率を測定する必要がある。しかしながら、この作業に手間と時間を要するため、本方法も被乾燥材の含水率を測定する方法としては適当でない。

さらに、電気抵抗式や高周波式、重量式の含水率の各測定方法に共通して言えることは、測定された含水率が被乾燥材の中の1本あるいはたかだか数本のサンプル材の値であることと、測定されたサンプル材の含水率の値が被乾燥材の含水率分布(ばらつきが大きい)のどの位置にくるのかということが分からないことである。この点からも、電気抵抗式や高周波式、重量式による方法は、被乾燥材の含水率を測定する方法として適当でない。

3. 考案した含水率の測定方法と木材乾燥のための制御方法

3.1 被乾燥材の含水率の測定方法

本研究では、被乾燥材の乾燥程度を表す指標として被乾燥材全体の含水率の平均値(平均含水率と呼ぶ)を採用することにした。また、乾燥室から排出される結露水が被乾燥材から除去された水分であることに着目し、この結露水の積算重量から被乾燥材全体の平均含水率を求める方法を考案した。

考案した含水率の測定方法は、予め乾燥前に被乾燥材の平均含水率(初期平均含水率と呼ぶ)を推定しておき、乾燥処理中は結露水の積算重量から被乾燥材の平均含水率の減少量を推定し、この値を予め求めておいた初期平均含水率の値から差し引くことによって被乾燥材の平均含水率を求めるものである。

被乾燥材の初期平均含水率、平均含水率の減少量及び

平均含水率の各推定方法を次に述べる。

(1) 初期平均含水率の推定方法

被乾燥材の初期平均含水率は、次のようにして推定する。

①被乾燥材の乾燥前の総重量 W_i [kg]を求める(重量測定機能を備えたフォークリフトなどを使うことによって簡単に求めることができる)。

②被乾燥材の全体積 V_i [m^3]を求める(木材の体積と本数の積を計算することによって簡単に求めることができる)。

③次式から被乾燥材の全乾総重量 W_a [kg]を計算する。

$$W_a = V_i \times r \quad (r \text{は被乾燥材の平均全乾比重} [kg/m^3])$$

④次式から乾燥前の被乾燥材の平均含水率 U_i [%MC]を計算する。

$$U_i = (W_i / W_a - 1) \times 100$$

さて、本方法では、被乾燥材の平均全乾比重 r の値として、製材所に持ち込まれる木材から適当なサンプリングによって求めた全乾比重の平均値あるいは一般に知ら

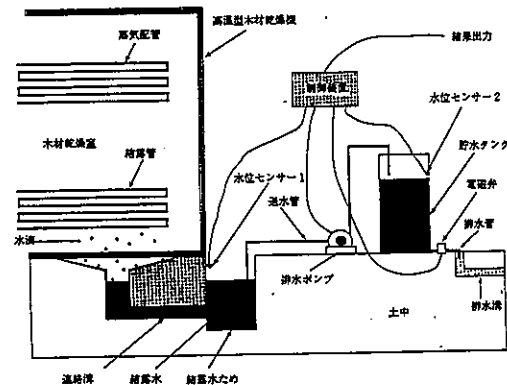


図1 結露水積算重量計測装置の構成

れている全乾比重の平均値を採用する。このような値を採用する理由は、たとえ個々の木材の全乾比重がどのような分布をしていようとまたそのばらつきが大きくても、多数の木材から成る被乾燥材全体の全乾比重の平均値は、製材所に持ち込まれる木材から適当なサンプリングによって求めた全乾比重の平均値あるいは一般に知られている全乾比重の平均的な値に近いものになると考えてよいからである(中心極限定理による)。

(2) 平均含水率の減少量の推定方法

被乾燥材の平均含水率の減少量は、次のようにして推定する。

まず、結露水の積算重量を求めるための手段として、図1に示すような計測装置(結露水積算重量計測装置と呼ぶ)を用意する。この装置は、水位センサー1、送水管、排水ポンプ、貯水タンク、水位センサー2、電磁弁、排水管及び制御装置などから構成され、次のような一連の動作(①~③)を繰り返す。

①乾燥室内から排出される結露水が連絡溝を通じて結露水のためにたまり、結露水のための水位がある高さまで達し

たら排水ポンプを起動して結露水のための水を貯水タンクへくみ出す。

②貯水タンクの水位がある高さまで達したら排水ポンプを停止させると同時に排水管の電磁弁を開いて貯水タンクの水を排水溝へ流す。

③しばらくして貯水タンクが空になったら排水管の電磁弁を閉じる。

次に、時刻 t [H] までの結露水の積算重量 $Qy(t)$ [kg] を以下の式から求める。

$$Qy(t) = N(t) \times \#t$$

ここで、 $N(t)$ は時刻 t [H] までのこの計測装置における一連の動作 (①~③) の繰り返し回数、 $\#t$ [kg] は貯水タンクの 1 回の貯水重量である。

最後に、被乾燥材の平均含水率の減少量 $\Delta Ud(t)$ [%MC] を次式から計算する。

$$\Delta Ud(t) = Qy(t) / \#a$$

ただし、 $\#a$ は被乾燥材の全乾総重量[kg] である。

(3) 平均含水率の計算方法

乾燥処理中の時刻 t [H] における被乾燥材の平均含水率 $Uy(t)$ [%MC] は次式で与えられる。

$$Uy(t) = Ui - \Delta Ud(t)$$

ここで、 $\Delta Ud(t)$ は時刻 t における被乾燥材の平均含水率の減少量[%MC]、 Ui は被乾燥材の初期平均含水率[%MC] である。

3.2 平均含水率に基づいた木材の乾燥制御方法

(1) 乾燥制御方法

考案した乾燥制御方法は、乾燥室の乾燥能力を被乾燥材からの水分の蒸発能力に見合ったものに調整するために、次のような一連の動作を一定時間毎に繰り返すというものである。

①上記3.1で述べた方法によってその時点における被乾燥材の平均含水率を推定する。

②次の(2)で述べる乾燥スケジュールから平均含水率に対応した平衡含水率の目標値(目標平衡含水率と呼ぶ)を計算する。

③次の(3)で述べる平衡含水率表から目標平衡含水率と乾球温度に対応した相対湿度の目標値(目標相対湿度と呼ぶ)を求める。

④乾燥室内の相対湿度を目標相対湿度になるように調節する。

ただし、乾燥室内の乾球温度については、設定温度になるように調節されているものとする。

(2) 乾燥スケジュール

乾燥スケジュールとは、木材をできるだけ損傷を少なく安全に、かつ、短時間に乾燥させるために採られる乾燥室内の温湿度の設定計画のことである。

本制御方法では、Keylwerthの提唱した含水率スケジュール⁹⁾において木材の含水率と平衡含水率との比の

値を柱材用に一部変更した乾燥スケジュールを採用する。すなわち、被乾燥材の平均含水率 Uy [%MC] と乾燥室内の空気の平衡含水率 $Ueqr$ [%MC] との比を $k (= Uy / Ueqr)$ として、平均含水率 Uy が 30[%MC] 以下の範囲では割れや曲がりなどの損傷の発生を抑えるため k の値を小さく(1程度)するが、平均含水率 Uy が 30[%MC] 以上の範囲では乾燥速度を大きくするために Uy の増加に対応して k の値も増加させていく。なお、予め乾燥実験によって平均含水率 Uy と比 k と関係を求めておくものとする。また、乾燥室内の乾球温度は一定である。

この乾燥スケジュールにより、ある時刻における被乾燥材の平均含水率の値からその時点で設定すべき乾燥室内の空気の平衡含水率の値を求めることができる。

(3) 平衡含水率表

平衡含水率とは、ある温湿度の空気とその中に置かれた木材との間で水分の移動が平衡するような木材の含水率のことである。また、平衡含水率表とは、平衡状態にある空気の温湿度と木材の含水率との関係を表にしたものである。なお、この平衡含水率表に関しては、すでに知られているもの⁹⁾を採用する。

この平衡含水率表を用いてある時刻における乾燥室内の平衡含水率と乾球温度からその時点で設定すべき相対湿度の値を求めることができる。

4. 自動乾燥制御システムの概要

4.1 自動乾燥制御システムの構成と動作

高温型木材乾燥機のために設計した自動乾燥制御システムの構成を図2に示す。本システムは、結露水積算重

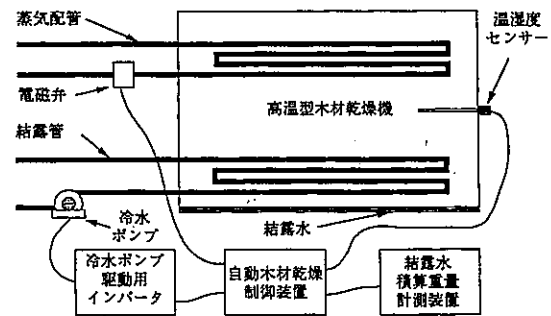


図2 自動乾燥制御システムの構成

量計測装置、温湿度センサー、冷水ポンプ駆動用インバータ、冷水ポンプ、電磁弁及び自動木材乾燥制御装置などから構成される。

自動木材乾燥制御装置が、予め入力された乾燥スケジュールと被乾燥材の総初期重量及び給体積に基づいて、一定時間毎に、結露水積算重量測定装置、温湿度センサーからその時刻における結露水の積算重量、乾球温度及び相対湿度の各値を取り込み、最適な冷水ポンプ駆動

用インバータの設定周波数値と電磁弁の設定値(ON/OFF)を計算した後、計算結果を冷水ポンプ駆動用インバータ及び電磁弁にそれぞれ出力する。

4.2 自動木材乾燥制御装置の機能と処理

自動木材乾燥制御装置の主要な機能は、乾燥室内の相対湿度と乾球温度の制御である。

相対湿度制御では、測定された結露水の積算重量 Qy から被乾燥材の平均含水率 Uy を推定し、推定された平均含水率 Uy から平衡含水率の目標値 $Ueqr$ を計算し、計算された平衡含水率の目標値 $Ueqr$ から相対湿度の目標値 Hr を計算し、計算された乾燥室内の相対湿度の目標値 Hr と現在値 Hy との差 Hd から冷水ポンプ駆動用インバータの設定周波数 Fu を計算し、計算された設定周波数 Fu を冷水ポンプ駆動用インバータに設定する処理を一定時間毎に繰り返す(図3参照)。

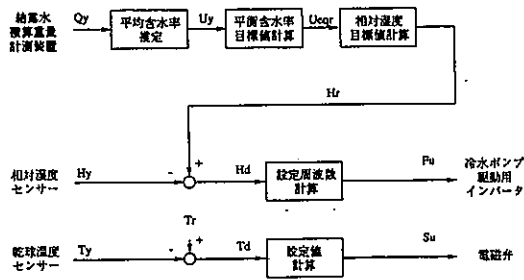


図3 自動木材乾燥制御装置の制御ブロック図

乾球温度制御では、乾燥室内の乾球温度の現在値 Ty を測定し、乾球温度の目標値 Tr と現在値 Ty との差 Td を計算し、この温度差 Td から電磁弁の設定値 Su (ONまたはOFFのどちらか)を求め、電磁弁を開閉する処理を一定時間毎に繰り返す。

5. おわりに

本稿では、高温型木材乾燥機のための平均含水率の測定方法と平均含水率に基づいた木材乾燥のための制御方法及び自動木材乾燥制御システムの概要について述べた。

本研究は、予算等の都合により木材乾燥制御方法の考案と自動乾燥制御システムの設計をもって終了した。

なお、現在は、構造がより単純でさらに性能のよい木材乾燥機の研究を行っている。この件に関しては、別の機会に紹介する予定である。

参考文献

- 1) F H式高温木材乾燥機(フジモ・オート)製品カタログ. 熊本, 藤本木材
- 2) 中村哲男, 大迫靖雄. "高温乾燥した木材の製品性能に関する研究". 本誌. No. 28, p. 10-16(1990).
- 3) 寺澤眞. "木材乾燥のすべて". 滋賀, 海青社, 1994. p. 40-42
- 4) 寺澤眞. "木材乾燥のすべて". 滋賀, 海青社, 1994. p. 645-647
- 5) 信田 聡, 千葉宗昭, 奈良直哉. "コンピュータによる木材乾燥操作の自動化(第2報)". 北海道林産試月報. Vol. 2, No1, p. 1-10(1988)
- 6) 寺澤眞. "木材乾燥のすべて". 滋賀, 海青社, 1994. p. 362
- 7) 寺澤眞. "木材乾燥のすべて". 滋賀, 海青社, 1994. p. 705

Ti(C, N) 微粉体の低温焼結

—スマートストラクチャーセラミックスに関する研究(第3報)—

永田正典*・本田悠紀雄*・末永知子*・上田直行**

Low Temperature Sintering of Ti(C, N) Fine Powder
—Study on Smart Structure Ceramics (3rd Report)—

Masanori NAGATA*, Yukio HONDA*, Tomoko SUBNAGA* and Naoyuki UEDA**

Ti(C, N)系セラミックスの低温焼結を図るため、Ti(C, N)原料または原料を化学エッチング処理した粉体を粉碎し、得られた微粉体に焼結助剤としてTiB₂微粉体を30wt%添加し、ホットプレスを使用して真空下一軸加圧焼結を行った。焼結温度と焼結体の曲げ強さとの関係を調べた結果、原料粉体の場合、最大の曲げ強さとなる焼結温度は1700°Cであったが、24h微粉碎するなら、1600°Cと100°C低くなるとともに、平均の曲げ強さは925MPa(原料粉体1700°C 695MPa)となり、30%以上焼結体の曲げ強さが向上した。一方、化学エッチング処理した粉体では24h微粉碎すると1600°Cで焼結体の曲げ強さは最大となるものの、原料粉体を24h微粉碎した場合に比べ曲げ強さは小さくなることが分かった。このことについて、焼結体破断面の微構造観察から、化学エッチングを行うと粉体粒子表面が酸化され、焼結時TiB₂と反応しB₂O₃が生成・蒸発し焼結体に気孔が多く発生するので、曲げ強さの向上につながらなかったと考えられる。

1. はじめに

窒化チタンに炭素が固溶した炭・窒化チタン(Ti(C, N))系セラミックスは、鉄鋼材料に比べ高硬度・高強度であり、耐摩耗性に優れているといった機械的性質とともに金属なみの導電性を有することから、切削工具類や導電性の耐熱構造材料としての利用が考えられている。

1. 2)

そこで、著者等は平成5年度から実施しているスマートストラクチャーセラミックスに関する研究(広域共同研究)の一環として、セラミックス構造材に圧電性薄膜を付けたスマートストラクチャーセラミックスを作製する際のセラミックス構造材としてTi(C, N)系セラミックスを取り上げ、Ti(C, N)系セラミックス粉体の微粉碎化による低温焼結を図るため、Ti(C, N)原料粉体の微粉碎と微粉体を用いた焼成研究を行った。

すなわち、Ti(C, N)原料粉体の粉碎を促進させるため、原料粒子表面に「きず」を化学エッチングによってあらかじめ発生させると化学的クラック形成促進効果¹⁾が認められ、微粉碎が可能となることを前年度明らかにした。²⁾そこで、本年度は微粉体をホットプレス焼成して得られる焼結体の曲げ強さ、破断面の微構造と焼結温度との関係を中心に調べ、最大の曲げ強さを有するための微粉碎条件及び焼結温度を明らかにした。

* 材料開発部

** 電子部

2. 実験方法

Ti(C, N)原料粉体として、新日本金属(株)製Ti(C_{0.8}, N_{0.2})固溶粉末(平均粒子径1.22μm)を用いた。また、化学エッチング液として、HF(2.0mol/L)、HNO₃(4.5mol/L)、CH₃COOH(4.3mol/L)、H₂O₂(3.3mol/L)の混合溶液(合計14.1mol/L)を調整し、使用時1/20濃度(0.705mol/L)に純水で希釈した。

まず、Ti(C, N)原料粉体約30gを希釈エッチング液100mlに入れ、かくはんしながら15min浸せきした。エッチング後、処理物をろ過、水洗、風乾した(以降エッチング粉体と呼ぶ)。

微粉碎は主に1Lのアルミナ製ポットミルで行った。すなわち溶媒、粉碎媒体、砕料としてそれぞれイソプロピルアルコール400ml、3φジルコニアボール400ml、Ti(C, N)原料またはエッチング処理粉体53gをポットミルに入れ、回転速度90rpmで所定時間粉碎した。しかし、1回の粉碎で微粉体を多く得る場合は、4Lポットミルを使用した。その際、溶媒と媒体は共に800ml及び砕料は106gで、ポットミルの回転速度は90rpmとした。粉碎終了後、内容物を取り出しジルコニアボールをふるいで分離した後、泥しょう液をロータリーエバポレーターを使用して微粉体とイソプロピルアルコールに分離した。原料、微粉体の比表面積と平均粒子径は、それぞれ液体チッ素温度下における3点N₂ガス吸着によるBET法とレーザー光散乱法によって求め、また粉碎にともなうTi(C, N)の結晶性の変化は、粉末X線回折法(XRD)により、最大の回折強度を示すTi(C, N)(200)面における強度(CPS)を求め、

粉碎前に対する相対強度として表した。なお、回折強度は繰り返し10回測定し、その平均値を採用した。

Ti(C,N)粉体の焼結として、まずTi(C,N)粉体に焼結助剤となるTiB₂微粉体(H. C. Starck社製、平均粒径4.3 μmをあらかじめ上記条件で72 h 粉碎した。微粉碎後の平均粒子径は1.57 μm)を30wt%となるように加え、更に1hらいかい機でかくはん混合させ焼結用粉体を調整した。

次にこの焼結用混合粉体100gを黒鉛型(内径 60mm φ)に充てんしてホットプレス装置(中外炉社製HP15型)に設置後、真空下で5MPaの一軸加圧を行いながら、所定温度で1h保持した後炉冷した。なお、Ti(C,N)が型内壁に融着するのを防止するため離型剤としてBN粉末を充てん前に薄く塗布した。焼結体(60 φ × 5)から曲げ強度測定用試料を切り出し、3 × 4 × 36mmに鏡面仕上げ(表面粗さ0.2S以内)を行った。なお、曲げ強度測定は4点曲げ法(JIS R 1601)で行った。クロスヘッドの降下速度は8.3 μm/sとし、支点間距離は上部10mm、下部30mmとした。また、各試料あたり5本測定した。

その他、焼結体破断面の微構造をFE-SEMで直接観察した。

3. 実験結果と考察

3.1 微粉碎効果

原料とエッチング粉体について、1Lポットミルを使用して微粉碎を行い、粉碎時間と微粉体の比表面積との関係を調べた結果を図1に示す。原料とエッチング粉体の

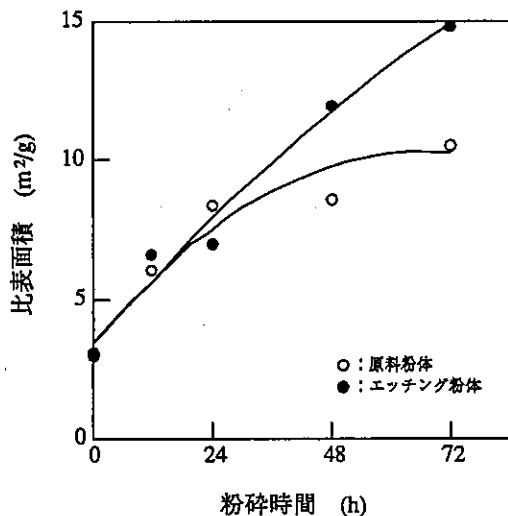


図1 Ti(C,N)微粉碎時間と微粉体の比表面積との関係 1Lアルミナポットミル使用

比表面積はそれぞれ3.45、4.05 m²/gであり、エッチングにより原料粒子表面が溶解し比表面積が若干大きくなったと考えられる。また、粉碎時間が24hまでは微粉体比表面積の差は小さいが、24h以降ではエッチング粉体が

大きくなり、その差も粉碎時間とともに開く傾向にある。すなわち、エッチングによる微粉碎効果が現れていることを示している。

また、エッチング効果に関して、粉碎時間にもなうTi(C,N)微粉体の結晶性の変化を調べると、図2に示すと

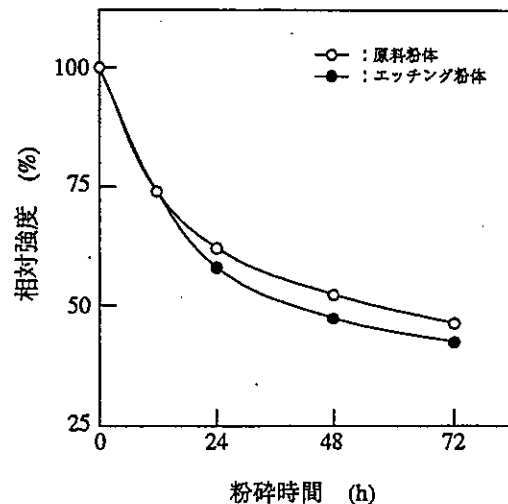


図2 粉碎時間にもなうTi(C,N)微粉体の結晶性の変化 ○, ●はそれぞれTi(C,N)原料、エッチング粉体について所定時間粉碎(1Lアルミナポットミル)して得られた微粉体のXRDパターンからTi(C,N)(200)面におけるピーク強度を求め、粉碎前後のピーク強度比として表している。

おり粉碎時間が長くなるに従っていずれも結晶性は悪くなるが、エッチング処理を行った方が結晶性の低下はより大きく非晶質化が進行していく様子が分かる。

すなわち、エッチング処理を行うと微粉碎が促進され、かつ微粉体の結晶性が更に低下するため、微粉体の焼結が容易となり成形体の焼結温度も低下すると考えられる。

3.2 Ti(C,N)粉体の低温焼結

まず、Ti(C,N)粉体の焼結に及ぼす微粉碎効果を調べるため、Ti(C,N)原料粉体(A)、原料粉体を24h微粉碎した試料(B)、エッチング処理粉体を24h微粉碎した試料(C)について、焼結温度と焼結体の曲げ強さとの関係を求めた結果を図3に示す。原料粉体の場合、1700°Cで焼結体の曲げ強さは695MPaと最大となり、渡辺等¹⁾の報告とほぼ一致する。一方、原料粉体を24h微粉碎し微粒子化(平均粒子径1.86 μmから0.33 μmに変化)すると、原料粉体に比べ1500~1800°Cの焼成温度域において焼結体の曲げ強さは大きくなるとともに、最大強度を示す焼結温度は1600°Cと100°C低く、かつ曲げ強さは925MPaとなり、原料粉体を1700°Cで焼結した場合より30%以上強度の向上が図られることが分かる。しかしエッチング粉体では24h微粉碎(平均粒子径1.79 μmから0.33 μmに変

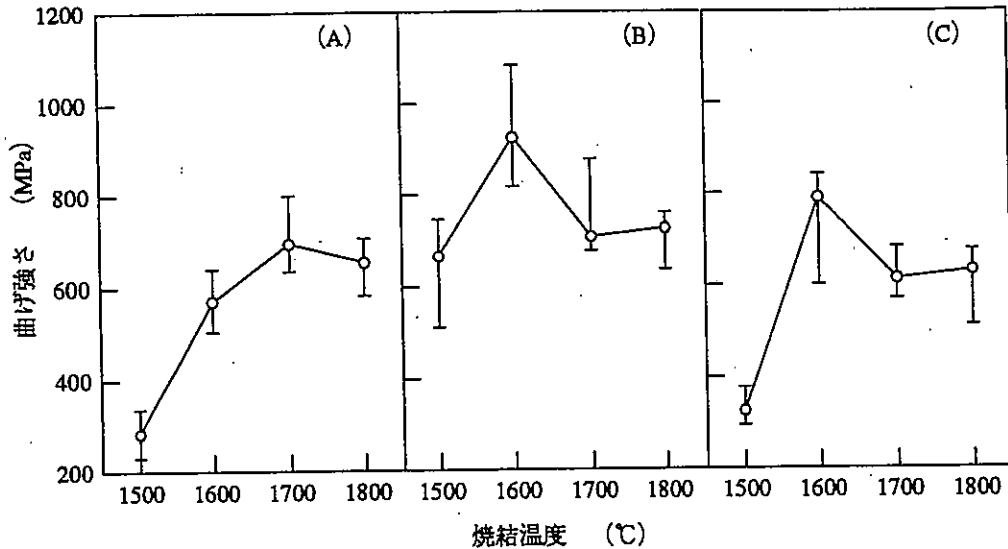


図3 各種 Ti(C,N)粉体を一軸加圧(5MPa)下で1h真空焼結を行った時の焼結温度と焼結体の曲げ強さとの関係

(A)Ti(C,N)原料粉体、(B)原料粉体を24h粉砕(1Lポットミル)、(C)エッチング粉体を24h粉砕(1Lポットミル)

化)すると最大強度を示す焼結温度は1600°Cとなるが、原料粉体を24h粉砕した試料に比べ焼結体の曲げ強さは小さくなっている。そこで、粉体粒子の細かさが焼結に及ぼす影響を調べるため最高の曲げ強さとなる1600°Cで焼結を行い、微粉体の比表面積と焼結体の曲げ強さとの関係を求めると図4に示すとおりとなる。比表面積が大

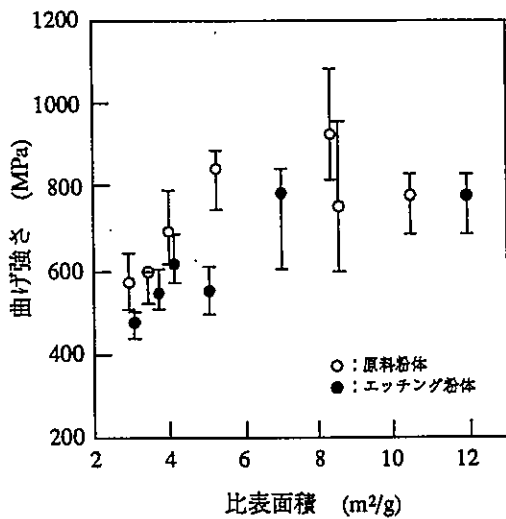


図4 Ti(C,N)微粉体の比表面積と焼結体の曲げ強さの関係

○, ●はそれぞれTi(C,N)原料、エッチング粉体について、1Lまたは4Lのポットミルを使用して所定時間粉砕後、TiB₂30wt%を添加し1600°C下1h真空一軸加圧(5MPa)焼結させた時の焼結体の曲げ強さと微粉体の比表面積を示している。

きくなる(粒子径が小さくなることに対応する)と曲げ強さも大きくなるが、原料粉体では8m²/g付近で最大と

なりそれ以上になると逆に減少している。このことについて、粒子があまり小さくなりすぎたため粒子充填性が悪くなり、今回用いたホットプレス焼成時の圧力(5MPa)程度ではち密な焼結体が得られず、更に高圧下での焼結が必要だと思われる。また、エッチング粉体の場合、全体的に原料粉体を微粉砕した試料に比べ曲げ強さは小さくなっている。すなわち、前述したとおり原料粉体をエッチングすることにより微粉砕化は達成することができても、焼結体の曲げ強さの向上にはつながっていないことが分かる。そこで、この原因について考察するため、図3中1600°Cで焼結させた各試料について、焼結体破断面の微構造を調べた。図5に曲げ強さを測定した試料の破断面のSEM像を示す。

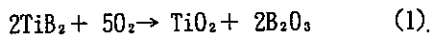
図5に示す結晶粒で、黒色状粒はTiB₂、白色状粒はTi(C,N)と考えられる。原料粉体(A)の場合、1600°Cでは焼結が不十分であり、かつ空孔も多く認められる。一方、原料粉体を24h微粉砕(B)すると、原料粉体に比べTiB₂とTi(C,N)粒は明りょうで、Ti(C,N)粒の大きさは小さく、また気孔の数も少なくなっている、全体的にち密となっている。しかし、エッチング粉体を24h微粉砕(C)すると、Ti(C,N)粒の大きさは小さいものの、(B)に比べ気孔の数が多くなっている様子が分かる。

一般的に焼結体の破壊強度は、気孔率と結晶粒径に大きく影響され、気孔率が小さくかつ結晶粒径が小さい程破壊強度は大きくなる。Ti(C,N)系セラミックスは焼結の進行に従って、粒成長が著しく強度低下を招くので、粒成長を防止するためTiB₂が焼結助剤として添加される。しかし、TiB₂は酸素が存在すると(1)式に示すとおり焼結温度でB₂O₃が生成し、更にB₂O₃が蒸発し焼結体は高い



図5 焼結体破断面の微構造 (A), (B), (C)は図3と同様

空げき率を有するようになるといわれている¹⁾。



(C)の場合、Ti(C, N)を混酸エッチングしたため、Ti(C, N)粉体粒子表面は相当酸化されている事実、粉体のXPS分析⁴⁾から、エッチング粉体が原料粉体に比べ $0.1s_{1/2}$ の光電子強度が強く検出している。と考えられる。したがって焼結時に表面酸化物が酸素供給源となり、(1)式による B_2O_3 が生成・蒸発し気孔が多く発生するので、焼結体の曲げ強さの向上につながらなかったと考えられる。結局、原料粉体をエッチング処理して微粉砕を行っても焼結体の曲げ強さの向上は認められず、原料粉体を24h微粉砕した試料を焼結原料として用いると、従来の焼結温度より 100°C 低い 1600°C で最大の曲げ強さを有する焼結体が得られることが明らかとなった。

4. まとめ

Ti(C, N)原料粉体の微粉砕及び焼結体の機械的性質を検討し、以下のことを明らかにした。

- (1) Ti(C, N)原料粉体を希釈混酸でエッチングを行うと、微粉砕が促進されかつ微粉体の結晶性が低下することが分かった。
- (2) 原料粉体を24h粉砕した後、 1600°C でホットプレス焼結を行うと、焼結体の曲げ強さは 925MPa となり、従来(1700°C 、 695MPa)より30%以上曲げ強さが向上するとともに 100°C 焼結温度の低下が図れることが分かった。

- (3) エッチング粉体の場合24h粉砕すると、 1600°C 焼成が最良となるものの、焼結体の曲げ強さは原料粉体を24h粉砕した場合より小さく、焼結体に気孔が多く発生するため、曲げ強さの向上につながらなかったと推察した。

謝辞

本研究を行うにあたり適切な御指導をいただいた、九州工業技術研究所 無機複合材料部長 渡辺忠彦氏、及び物質工学工業技術研究所 主任研究官 伊ヶ崎文和氏に謝意を表します。

文献

- 1) 菅蒲一久, 渡辺忠彦, 山本秀樹. “Ti(C, N)- TiB_2 系ホットプレス焼結”. 窯業協会誌, vol. 93, P. 252-256 (1985)
- 2) 森山実, 青木博夫. “B₂CとTiN粉末の反応による TiB_2 -TiN_{0.5}C_{0.5}複合焼結体の作製とその機械的特性”. *J. Ceram. Soc. Japan*, vol. 104, P. 333-339 (1996)
- 3) 伊ヶ崎文和. “粉砕操作における物理化学的側面について”. 粉体工学会誌, vol. 29, P. 772-781 (1992)
- 4) 永田正典, 本田悠紀雄, 末永知子, 上田直行. “化学エッチングによるTi(C, N)粉体の微粉砕効果—スマートストラクチャーセラミックスに関する研究(第1報)—”. 本誌, vol. 33, P. 62-64 (1995)

高温高圧水を用いた繊維強化プラスチックの分解・再利用技術に関する研究

—廃棄プラスチックの再利用に関する研究—

永岡昭二*・永山賛平*・上村誠**・上野勝彦*・菅田孟***・中根堯***

Decomposition of Fiber Reinforced Plastics using High-Temperature High-Pressure Water

—Recycling Technology of Waste Plastics Polymer—

Shoji NAGAOKA*, Sanpei NAGAYAMA*, Makoto UEMURA**, Katsuhiko UENO*,
Tsutomu SUGETA*** and Takashi NAKANE***

繊維強化プラスチックを高温高圧水との接触により、高速で分解し、化学原料および強化繊維材料を回収できることが分かった。高温高圧水を用いる繊維強化プラスチックの分解は330℃、12.8 MPaで完了することができ、これら分解物は気相、油相、水相および繊維材料の固形物に分かれた。気相中には主に、炭酸ガス、数種類の炭化水素が含まれた。また液相には繊維強化プラスチックを構成しているポリスチレンに由来するスチレンオリゴマーおよびベンゼン核に基づいた芳香族炭化水素類と不飽和ポリエステルに由来するフタル酸誘導体が含まれた。さらに、繊維材料は、走査型電子顕微鏡写真観察およびTG-DTA測定等でキャラクタリゼーションすることにより、未処理の繊維材料と比較し、変化はないことが確認できた。このことより繊維材料についても再利用が可能であることが分かった。

1 はじめに

地球環境の保全及び資源の有効利用の観点から廃棄物の処理及びその再使用が重要となっている。日本の場合、廃棄物が年間100万トン以上になると社会問題になり、たとえばポリエチレン(200万トン)、塩化ビニル(140万トン)などは、量の面で問題となっている。高強度複合材料である繊維強化プラスチック(FRP)は、生産量45万トンと量こそ少ないが、炭素繊維やガラス繊維を強化材料として、主材にポリスチレンと不飽和ポリエステルを架橋させた熱硬化性樹脂を用いるプラスチック複合材料であり、高強度性、軽量性、耐久性、耐蝕性、減衰性、耐衝撃性、耐磨耗性など優れた特性を有しているため、

逆に再資源化すなわち廃棄物処理において、FRP廃棄物は破碎しにくく、燃焼が困難で、多量のガラス分を含むなど、プラスチックの中でも処理が非常に困難なものの一つである。

したがって今後、廃棄物として多量に排出されることが予想されている。とくに船、航空機、浴槽、浄化槽等に用いられているが、耐用年数の経過したものの処理技術が確立しておらず、廃船等の放置が社会問題となっている。FRPなどの熱硬化性樹脂についての報告は少なく、これらは高エネルギー条件下での焼却もしくは埋立て処理されているのが現状である。リサイクル法が施行された現在、リサイクルを含むFRPの有効な処理方法が早急に望まれている。

本県でもこれらの現状調査を行ったところ、関連企業は同様な問題を抱えており、処理対策に困っていることが改めて再確認された。たとえば食品会社の調味料の貯蔵大型タンクがFRP製であるため、処理することができない。さらに本県では歴史・地理的に西に天草地方、南に八代海を中心として、漁業・造船業が盛んであり、船関連のFRP廃材の処理が問題視されている。

プラスチックの分解方法として、分解炉に空気や燃焼ガスなどを吹き込み、可燃性ガスや油分、活性炭などを回収する乾留すなわち熱分解法^{1, 2)}があり、これについては数多くの報告や実績が見られる。しかしFRPなどの熱硬化性プラスチックの報告は少ない。これはガラス繊維の分離の困難さやプラスチックに含まれる無水フタル酸の装置の内壁への凝固、FRP材の熱伝導率の悪さなど、FRPの熱分解には多くの問題点があるためと考えられる。たとえば全国漁業共同組合連合会ではタイヤ用

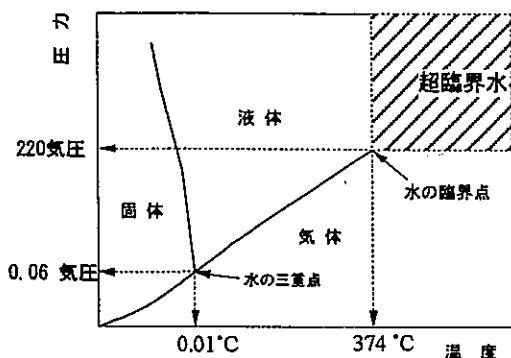


図1 水の存在状態

*材料開発部
**生産技術部
***工業技術院物質工学工業技術研究所

乾留炉を用いたFRP漁船破砕物の熱分解実験を行い、FRP熱伝導性、炉の操作性などに問題ありと指摘している。また水蒸気中での熱分解は、500°C以上の高温を必要とし、300°C程度では不十分であると報告している^{3, 4)}。

そこで本研究では低温で分解でき、しかも分解物を系外に排出せずに、分解物及び繊維強化材料を抽出回収するシステムを構築することを目的として、特異な溶媒特性を示すといわれる亜臨界及び超臨界における分解反応に着目し、高温高压水中でFRPを反応させ、これらの分解挙動並びに分解物・非分解物について検討を行った。

2 実験方法

2.1 原理

図1に示すように、超臨界水(臨界温度: $T_c = 374^\circ\text{C}$, 臨界圧力: $P_c = 22.1\text{MPa}$)では温度、圧力の変化に伴い、反応に大きな影響を与える物性が大きく変化する。たとえば常温、常圧での水の誘電率が80程度であり、極性が高いことから、極性が低い有機化合物をほとんど溶解することはできない。しかし超臨界水になると誘電率が著しく低下し、有機溶媒に近い値になるため、有機化合物が溶解するようになる。一方、水の解離状態を表すイオン積も通常の水に比べて10倍程度大きくなり、超臨界水自体が酸やアルカリに近い機能を示すようになる。したがって有機材料-無機材料の複合材の分解に適すと考えられる。

2.2 試料

FRP板材には一般にボート船舶用に用いられる素材を採用した。すなわちFRP造船メーカーから排出されたFRP廃材を使用した。これらFRP板材を5mm角に裁断し試料とした。

2.3 実験装置及び実験方法

生成ガス回収用ストップバルブを取付けた内容積12 m³のSUS316パイプ製反応器(図2)に、FRP試料を500mgと蒸

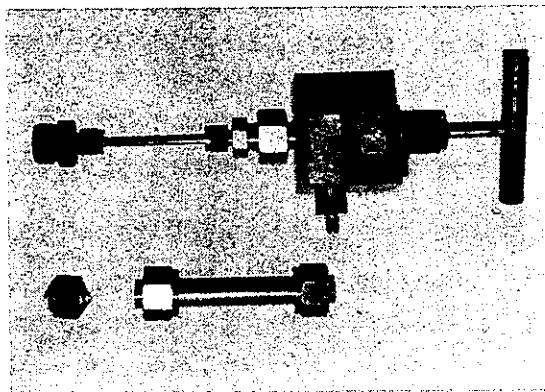


図2 高温高压水による分解装置

留水(0.3~3.4 g: 反応温度で設定圧力に達する算出量)を仕込み、真空ポンプを用いて減圧し、続いて圧力を大気圧に戻しながら、Arガスを封入した。あらかじめ反応温度に加熱した金属熔融塩浴の恒温槽に反応器を浸漬して昇温し、一定時間(30分間及び60分間)、放置した。反応温度は、330°C、380°Cとし、圧力は12.8~22.1MPaとなるように設定した。反応後の内容物は図3に示す操作に従い、ストップバルブを通して生成ガスを回収した後、反応器部をテトラヒドロフランで洗浄しながら、回収した。

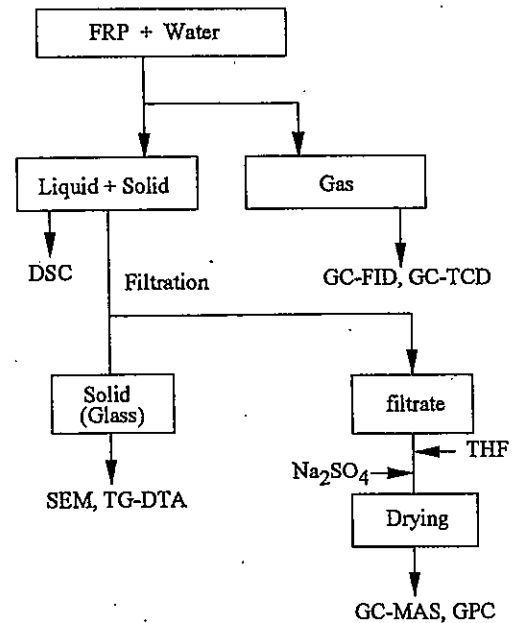
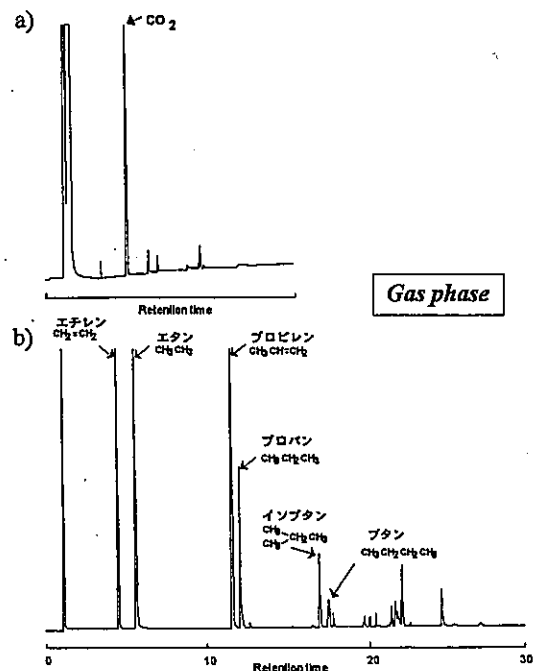


図3 生成物の分析操作



カラム: GL Science Pora PLOT Q length: 25 m X 0.53 mm, 1.D
Detector: a) FID, b) TCD, Temp.: -30 ~ 180 °C, 10 °C/min
Sample: System loading (H₂O, 37%), 380°C, 30 分

図4 回収された気体相のガスクロマトグラフ

3 結果及び考察

反応後の内容物は図3に示す操作に従い、分析を行った。はじめにストップバルブを通して、生成ガスを回収した。図4に示すように、ガスクロマトグラフ分析より、回収された気相には二酸化炭素およびメタン、エチレン、エタン、プロパン、プロピレン、イソブタン、ブタンなどの炭化水素を含んだ十数種類の低分子化合物が存在しているのが確認された。さらに残渣を回収したところ、図5に示すように、ガラス繊維・水・油状物質の3相に



図5 反応後における反応缶の内容物

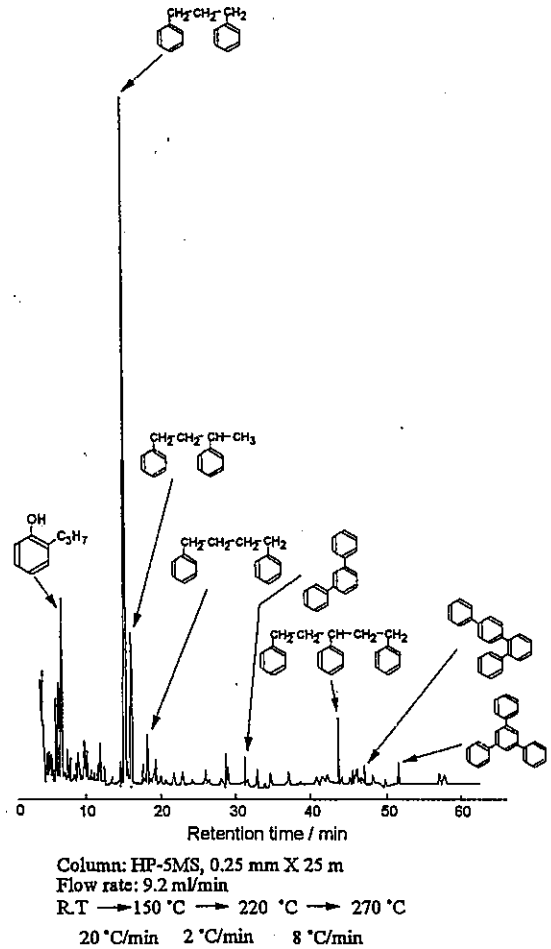
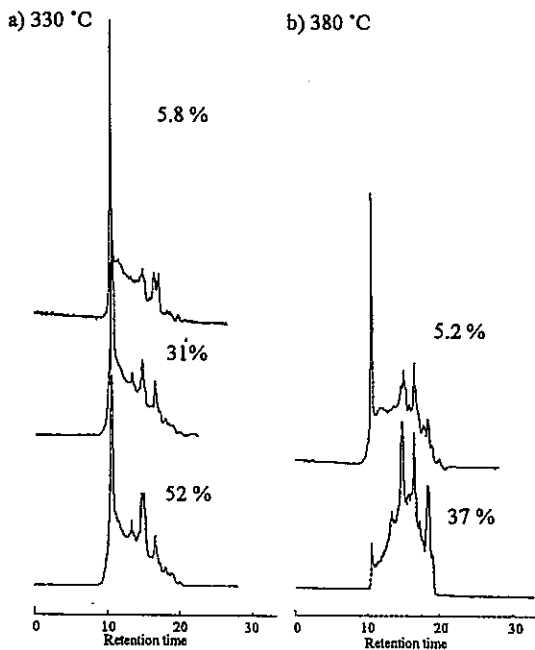


図7 油相のガスクロマトグラム



(a)330 °C 処理 (b)380 °C 処理,
Column: Shodex, GPC KF-801, 300 x 1.5 mm I.D., Flow rate:
0.5 ml/min, 溶離液: テトラヒドロフラン
5.2, 5.8, 31, 37, 52 % は水の充てん率
(system loading (6.5 cm³: system volume.))

図6 ERPから得られた水熱反応生成物のサイズ排除クロマトグラフィー溶出挙動

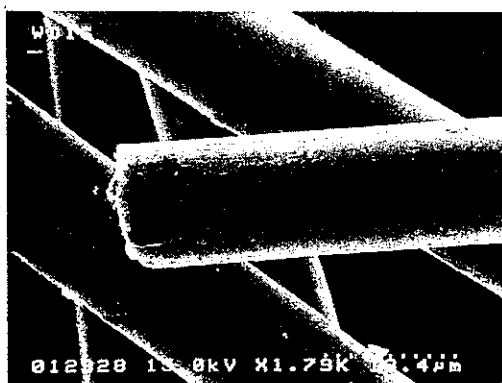
分離していた。そこで油状部分を非水系サイズ排除クロマトグラフィーにより分析し、分解挙動を調べた。図6に示すように、330°Cと380°Cで反応させた生成物を比較した場合、臨界点を越えた380°Cの条件の方がより、低分子化合物に分解しているのが確認された。また反応缶中の水の充てん率を増大させると、低分子量の物質を多く含有していることが確認された。とくに380°Cにおいて、水の充てん率が大きいほど、低分子に分解していることが明確に分かる。これは示差熱量分析において分解物の融点が、水の充てん率が大きい分解物ほど低温にシフトしていることから確認された。このことは圧力の増加と水の増大により加水分解反応が促進されたことに起因している。さらにこれらの物質を同定するために、GC-MASを用いて分析した。図7に示すように、スチレン骨格を単位とした分解物が多く存在していることが確認された。未使用のFRP中のプラスチックをFT-IRより同定すると、FRP中のプラスチックはポリスチレンと不飽和ポリエステルブレンドポリマーであることから、これらの結果はポリスチレンの主鎖のラジカル開裂が生じていることがわかる。またこれらのことは、反応条件に

よって、特定の物質を抽出できることを示唆している。

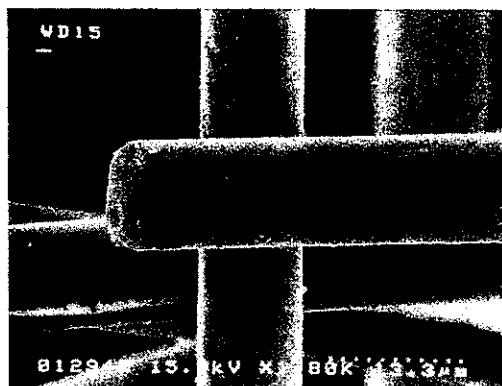
さらに固体相をテトラヒドロフランで洗浄し、精製物を回収した(図8)。得られた生成物には元素分析より、有機物の吸着がなかった。また図9に示すように、SEM観察より、未使用のガラス繊維と処理後のガラス繊維の表面を比較したところ、全く変化はなかった。さらに、未使用のガラス繊維より、元素分析、FT-IRから有機物の化学結合などがなく、純粋なガラスであることが確認された。これらのことは繊維の精製および再利用にも使用可能であることを示唆している。



図8 超臨界水分解物から抽出したガラス分



未使用の強化繊維



超臨界水処理後の強化繊維

図9 ガラス繊維の走査型電子顕微鏡写真

4 まとめ

本研究により、従来、産業廃棄物として埋立て、焼却されていた繊維強化プラスチック廃材を効率よく、分解・回収することが可能になり、反応条件によっては、特定の物質も得ることが可能である。さらに有毒な分解物を系外に排出せずに、回収・精製できるため、無公害性及び経済性を高めることができる。下記に特徴をまとめると、

(1) 高温高圧水を用いる繊維強化プラスチックの分解は330#C、12.8MPaで完了することができ、これら分解物は気相、油相、水相及び繊維材料の固形物に分かれた。

(2) 気相中には主に、炭酸ガス、数種類の炭化水素が含有されていた。また液相には繊維強化プラスチックを構成しているポリスチレンに由来するスチレンオリゴマー及びベンゼン核に基づいた芳香族炭化水素類と不飽和ポリエステルに由来するフタル酸誘導体が含まれた。したがって、反応条件によっては、特定の物質も得ることが可能である。

(3) 繊維材料は、走査型電子顕微鏡写真観察及びTG-DTA測定等でキャラクタリゼーションすることにより、未処理の繊維材料と比較すると変化はないことが確認された。このことより繊維材料についても再利用が可能であることが分かった。

文 献

- 1) 村田 勝英, 伊藤 秀伸."". 化学工学論文集. Vol: 349, p.9-(1983)
- 2) 全国漁業共同組合連合会."". 昭和62年度FRP漁船利用推進事業検討報告書. p.51-(1988)
- 3) 浜田 和秀, 細川 純, 西山 昌史." 水蒸気を用いるガラス繊維強化プラスチックの熱分解". 高分子論文集. Vol. 49, p.8-(1992)
- 4) 西山 昌史, 細川 純, 壁谷 洋, 浜田 和秀, 今井 清方, 植松 広子, 川北 浩久, 田村 光政 " ガラス繊維強化熱硬化性樹脂の廃棄物処理方法" 特許公開公報平4-100834". 東京特許庁. 1992

反応性スパッタリング法によるAlN薄膜の圧電特性

— 応力検知能力を有する構造用セラミックス材料に関する研究 (第5報) —

上田直行*・本田悠紀雄**・末永知子**・永田正典**

Piezoelectric Characteristics of AlN Thin Film Deposited Using Reactive Sputtering Method

-Study on Stress-Responsive Ceramics for Application to Frame Material(5th Report)-

Naoyuki UEDA*, Yukio HONDA**, Tomoko SUENAGA** and Masanori NAGATA**

今回、Ti(C,N)系微粉体で加工したセラミックス基板に、反応性スパッタリング法によってC軸配向したAlN薄膜を形成したセラミックス薄膜材料において、圧電性の有無を確認するために、インピーダンス・位相の周波数特性試験及び応力印加試験を行った。その結果、周波数33.9MHzにて有意と思われる共振現象及び位相の変化、並びに最大約200mVのインパルス状電圧の発生が得られた。

1. はじめに

当センターでは、圧電性セラミックス薄膜^{1, 2, 3, 4)}の研究開発を行っている。薄膜の作製には、反応性蒸着法及びゾルーゲル法、基板の作製には、微粉体の低温焼結法を採用している。今回、Ti(C,N)系微粉体で加工したセラミックス基板に、反応性スパッタリング法によってC軸配向したAlN薄膜を形成した。このセラミックス薄膜の圧電性を検証するために、インピーダンス・位相の周波数依存性、及び応力に対する電圧発生試験を行ったので報告する。

2. 測定方法

今回の測定方法は、暫定的に下記の方法とした。また、確実に圧電特性を有する市販の着火素子も併せて測定した。これは、着火素子を一種の標準特性とみなして、試作薄膜材料の圧電特性判定に供するためである。なお、インピーダンス・位相の周波数特性については、比較して考察するために、市販品ではん用の水晶発振器及びセラミックコンデンサについても測定した。

2.1 測定条件

1) インピーダンス・位相の周波数特性

評価装置：インピーダンス/ゲイン・フェーズアナライザ (HP製4194A)

周波数範囲：100Hz~40MHz

供試材料：試作したセラミックス薄膜材料及び市販

着火素子

寸法：15×15×5mm (試作セラミックス薄膜材料) / 5φ×9.81mm×1個 (市販着火素子)

電極：導電性ペースト付き導電シート+セロハンテープ (試作セラミックス薄膜材料) / 単しん銅線+セロハンテープ (市販着火素子)

試験方法：2端子法 (テストフィクスチャ)

2) 応力に対する電圧発生

評価装置：デジタルオシロスコープ (LeCroy製9354T)

サンプリング周波数：2GS/s SINGLE

供試材料：試作セラミックス薄膜材料及び市販着火素子

寸法：15×15×5mm (試作セラミックス薄膜材料) / 5φ×9.81mm×2個 (市販着火素子。厳密には前記周波数特性に使用した素子とは異なる。)

電極：導電性ペースト付き導電シート+セロハンテープ (試作セラミックス薄膜材料) / 市販着火装置専用電極 (市販着火素子)

試験方法：市販着火装置のぜんまいバネ式つまみ操作による。なお、試作セラミックス薄膜材料の寸法・構造に合うように、市販着火装置の取り付け部を改造して、材料を搭載した。応力は、材料のC軸配向した膜面ではなく、膜面と直角方向の側面から印加した。

2.2 評価方法

1) インピーダンス・位相の周波数特性

・インピーダンス・位相のマクロ的な直線性

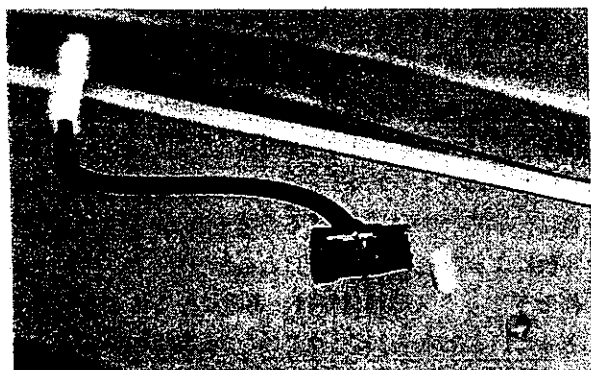
・インピーダンスの共振・反共振の確認

・位相の-から+への急激な立ち上がり、これに続く

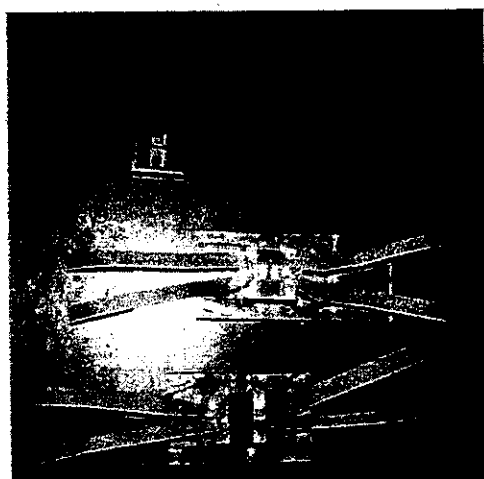
* 電子部

**材料開発部

- ・+から-への急激な立ち下りの変化
 - ・インピーダンスと位相との相互関係
- 2) 応力に対する電圧発生

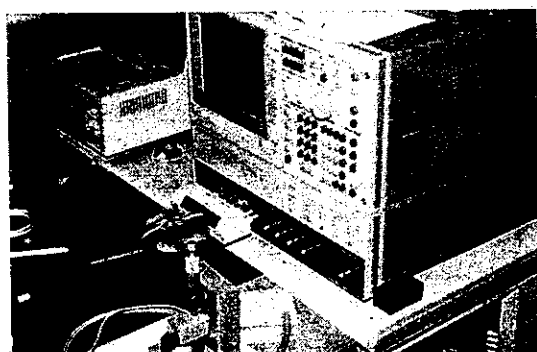


(a) 市販着火素子

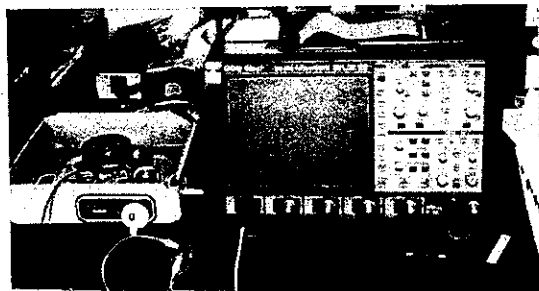


(b) 試作セラミックス薄膜材料

図1 供試材料



(a) 二端子法による共振現象特性試験（静特性）



(b) 市販着火装置を利用した圧電特性試験（動特性）

図2 圧電性評価試験装置

- ・インパルス状電圧の波形観測
 - ・時間の測定
 - ・発生電圧
- 3) インピーダンス・位相の周波数特性と応力に対する電圧発生との相互関係
- ・共振、反共振現象とインパルス電圧発生との相互関係
 - ・位相の急激な変化とインパルス電圧発生との相互関係
- (図1、図2)

3 試験結果と考察

1) インピーダンス・位相の周波数特性

試作セラミックス薄膜材料において、マクロ的にみたインピーダンスの周波数に対する直線性は、ほぼ右下がりの理想的なものが得られた。また、位相の周波数に対する直線性も、ほぼ横一直線の良好な結果が得られた。

セラミック材料という観点から、この試作セラミックス薄膜材料と0.0047 μ Fの汎用セラミックコンデンサの測定結果とを比較すると、コンデンサが約1MHz以上からの位相の急激な-から+への変化と、約8MHzでのインピーダンスの急激な増加は、試作セラミックス薄膜材料にはみられない。この試作セラミックス薄膜材料の両特性は、むしろ8MHzのはん用水晶発振器を測定した特性と酷似している。周波数特性のよい誘電特性あるいは静電容量を有する材料と考えられる。等価回路でいえば、L（コイル）、C（コンデンサ）、R（抵抗）からなる受動部品で構成された直並列等価回路で、ほとんどCだけの部品できている材料とみなせる。

市販着火素子についても、水晶発振器に準拠した特性、すなわち試作セラミックス薄膜材料と同一傾向の特性を有する材料と言える。

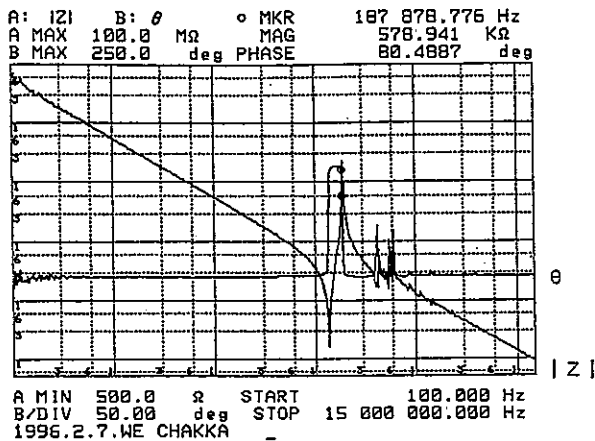
つぎに、試作セラミックス薄膜材料において、ミクロ的にみた位相の変化は、市販着火素子に見られるようなパルスの波形とはなっていないが、-側から+側、+側から-側へと変化がみられた。一方、インピーダンスの共振・反共振は、ほとんど得られていないが、強いて言えば、ほんのわずかだけその兆候が見られた。これらの特性は、周波数が約33.9MHz付近で得られている。はん用水晶発振器の正規の発振周波数は、7.98MHzと出たが、実際には3MHz付近にも共振点が出ていることを考慮すると、試作セラミックス薄膜材料の場合も、33.9MHzより高い周波数で共振している可能性がある。

この共振現象を、材料の薄膜の厚さの関係で考察すると、一般に厚膜の場合は低周波領域に、薄膜の場合は高周波領域に共振現象が現れると言われている。このことを考慮すると、今回試作の膜厚が約0.4~0.7 μ mであり、上限が約1 μ mであるから、およそ膜厚が1 μ m以下である場合は約30MHz以上（佐賀県工業技術センターで試作し

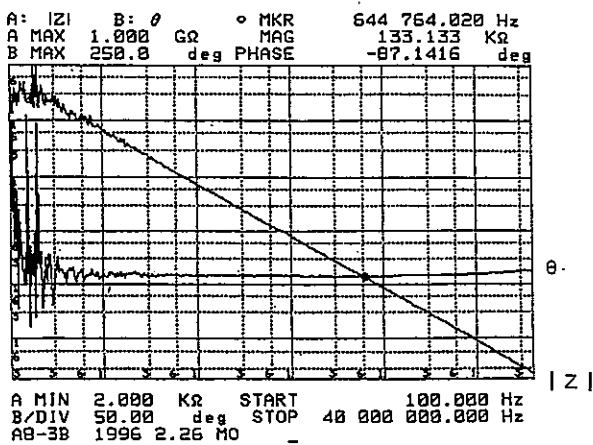
た類似の圧電性薄膜材料であるAIN+MoSi₂ (基板) 及びLiNbO₃+Al₂O₃ (基板) の例では、約600MHzから800MHz間で共振現象が得られている⁹⁾のを考慮すると、上限としては2GHz程度)、膜厚が1μm以上の場合は約40MHz以下(市販着火素子で説明したように、共振は187KHzで発生しているのを考慮すると、下限は100KHz程度)で共振現象が現れることを示唆していると考えられる。

一般に多結晶は低周波用、単結晶・薄膜は高周波用と言われている。今回使用の市販着火素子の正確な化学組成は不明であるが、PZT系の多結晶であることは、容易に想像がつく。市販着火素子では、約192KHz付近が共振点、そして試作セラミックス薄膜材料の共振点が33.9MHzとして得られたことは、このことをほぼ裏付けている。つまり、より厚膜にするにつれて、多結晶の物性に近づいていくことが想像できる。また、C軸配向性の観点から論ずると、市販着火素子は、分極処理はなされているものの、恐らく結晶の配向性は観測できないと想像される。にもかかわらず、共振現象や後述の電圧発生が得られるということは、試作セラミックス薄膜材料で、たとえC軸配向性が必ずしも得られなくても、共振現象や電圧発生が現れる可能性を秘めているように思われる。

インピーダンスと位相の相関は、わずかながら位相の



(a) 市販着火素子



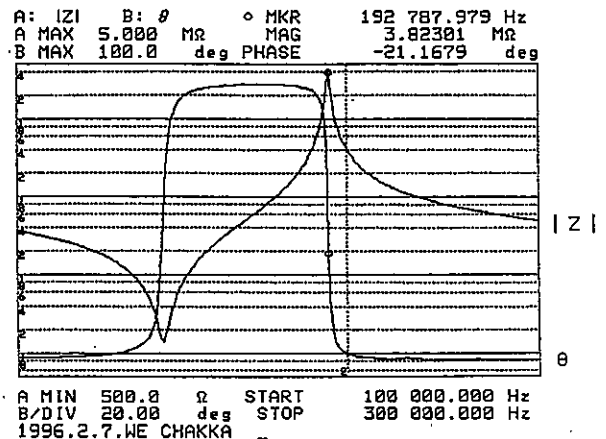
(b) 試作セラミックス薄膜材料

図3 インピーダンス・位相の周波数特性 (全体)

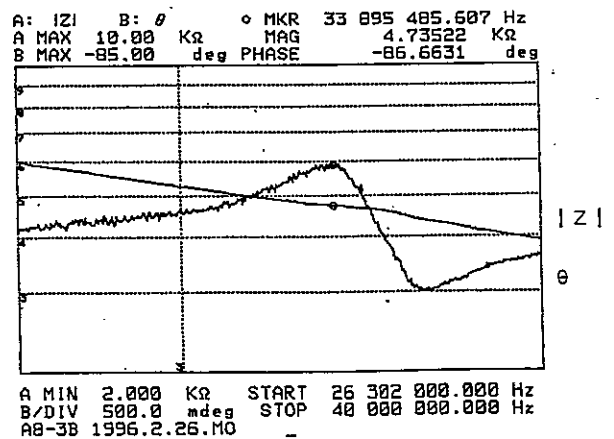
変化に対応したインピーダンスの変化が得られた。

水晶発振器は、着火素子よりさらに急しゅんな共振現象を示している。本セラミックス薄膜材料の研究開発は、圧電性を第一目標としているが、特性がよく似ていることから、水晶発振器の実現への可能性を秘めていると考えられる。また、実測データから、30MHz以上の高周波用コンデンサへの実現も考えられる^{6,7,9)}。

次にテストフィクスチャについて、市販着火素子の場合は、単芯のリード線による2端子法とノギス付き平行平板による方法とで結果がほとんど一致した。今回、試作セラミックス薄膜材料は、導電シートによる形態をとっているため、2端子法だけしか試験ができなかったが、4端子法、ノギス式(誘電体測定用)、チップ部品用測定等を考慮した材料の試作と測定を行い、どのような測定法をとろうとも、同一材料に対しては、同一結果が得ることを確認する必要がある(図3、図4、図5)。



(a) 市販着火素子

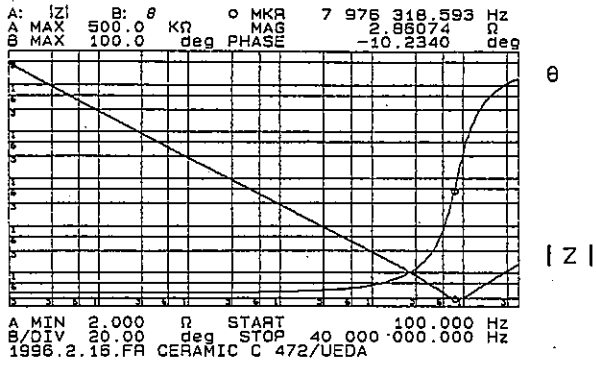


(b) 試作セラミックス薄膜材料

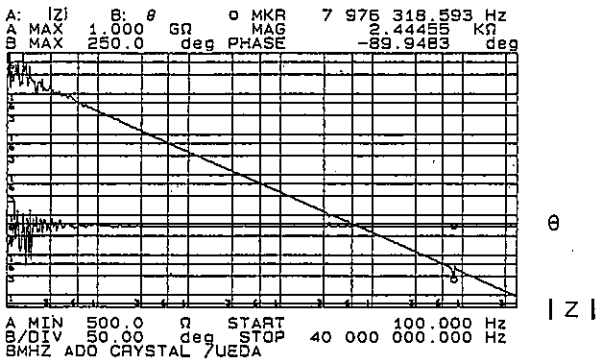
図4 インピーダンス・位相の周波数特性 (部分)

2) 応力に対する電圧発生

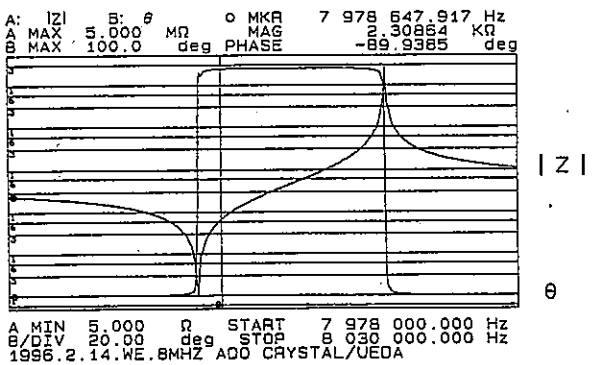
インパルス状応力に対する電圧発生値は、測定の都度異なるものの、最大200mV程度のものが発生した。電圧波形は、市販着火素子のインパルス応答波形と比べると、やや不自然なものも含まれるが、インパルス状のものも



(a) セラミックコンテナ



(b) 水晶発振器 (全特性)



(c) 水晶発振器 (共振点)

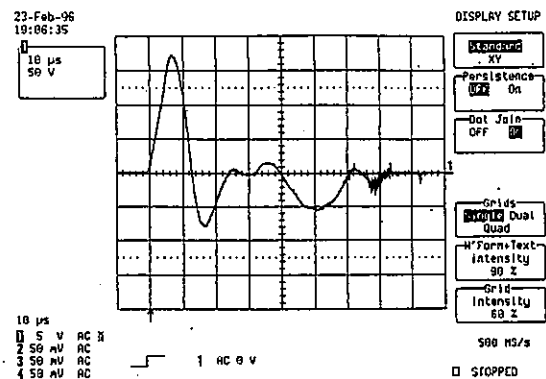
図5 電子デバイスにおけるインピーダンス・位相の周波数特性

得られた。また、波形は2~3周期で減衰して0Vとなる減衰振動波形が得られた。これは、材料そのものの特性と言うよりも、応力が反復減衰状に印加された結果と考えられる。応力の印加法は、球体落下法などもあるが、市販着火式は、つまみ・ぜんまいばね・金属などを組み合わせて、配向面に対し横方向から力を加える極めて単純なものでできており、市販着火素子の圧電試験を行った限りでは、極めて再現性がよい。しかし、それは元の発生電圧が計算値で約1800Vに対して測定感度を下げたため、微細な現象は埋もれた可能性が大きい。これに比べて、試作セラミックス薄膜材料は、材料自身の発生電圧が200mV程度であったために、測定感度を上げて測定したが、微少な応力や振動防止のための材料自身の取り付けが問題となってくる。すなわち、前述の応力のほかに、

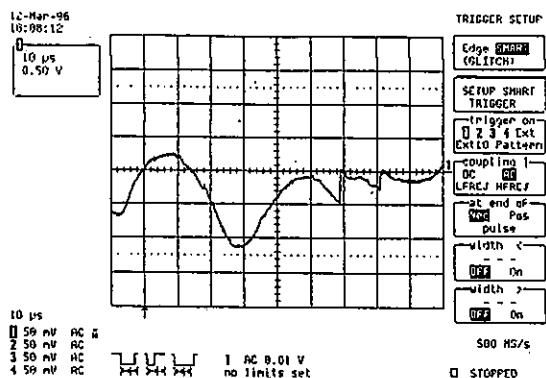
材料自身のズレによって振動が発生し、この振動で2回目以降の高次の電圧（2周期目、3周期目等の減衰振動波形）が発生したとも考えられる。そこで、本試作セラミックス薄膜材料でも、この着火方式を最大限有効利用できるように、材料の固定方法や発生機構を工夫する必要がある。すなわち、可能なかぎり応力が何回加わっても、材料のズレや振動の無い取り付け方法や、一回だけのインパルス状応力となるような機構にすれば、データの信頼性は一層増加する。また、今回は、C軸配向面と直角の方向からの印加であったが、C軸配向面上方向等応力の印加方向が同一装置で3次元的に行い、どの面方向が最も圧電効果があるかを見極める必要がある。すなわち、配向面・応力方向・変位方向・電界方向相互の関係を明らかにする必要がある。もちろん、電極の処理法、リード線の出し方、インピーダンス測定の様子やすさを考慮して、検討しなければならないことは言うまでもない。

なお、球体落下法や衝撃試験機については、球体の接地・供試材料固定・落下位置・落下材料・落下方法・供試材料の破壊等前記着火装置と併せて、材料に最適な試験法を検討する必要がある。

電圧発生時間は、1周期10~20μs程度であり、着火素子の測定結果や他の文献ともオーダ的には一致した



(a) 市販着火素子



(b) 試作セラミックス薄膜材料

図6 インパルス状応力に対する電圧発生

結果が得られた⁹⁾。

これらの現象は、実際に印加した応力と電圧の因果関係が得られれば、材料固有の現象なのか、他の要因によるものかがはっきりする。そのために、例えば応答速度の速い応力検知センサを取り付け、応力と電圧の2現象同時波形観測を検討する。この観測結果が得られれば、電圧発生時の応答性が高速か低速か明確となる(図6)。

3)インピーダンス・位相の周波数特性と応力に対する電圧発生との相関

共振現象とインパルス電圧発生との相関は、市販着火素子の例では、明確な相互関係すなわち共振・位相変化があれば電圧発生があり、逆に電圧発生があれば必ず共振・位相変化が見られる。一方、試作セラミックス薄膜材料については、明確ではないが、一応相関は得られると考えられる。ただし、インピーダンス・位相特性から圧電特性を予測すると、予想以上の電圧が得られており、逆に圧電特性からインピーダンス・位相特性を予測すると、予想に反して共振点・位相の変位があまり得られていない矛盾がある。

これは、共振現象側から考えると、本当の共振点は前記33.9MHzより高い周波数で現れている可能性があること、従って、もし共振現象が40MHz以内で出なくても、応力試験により、圧電現象が出る可能性があるを示唆している。

一方、圧電特性側から考えると、一応の圧電性が得られたのであるから、もし40MHz以内に共振周波数が現れないとすると、それ以上の周波数領域で必ず共振が存在するはずであるということを示唆している(図6)。

以上の測定結果から、今後以下の点について研究する。

1)電極について

特性の不安定性や再現性の欠如の一因として、電極の処理方法があげられる。今後、銀ペースト処理などによる堅牢な電極で試験を行う予定である。また、電極形状に関しては、くし形のみならずべた形状なども作製及び測定する必要がある。さらに、電極の取り付け位置も検討する必要がある。

すなわち、これらの電極は、インピーダンス・位相等の特性を測定するテストフィクスチャの形状に合わせることは勿論のこと、着火装置等の応力試験についても、取り付けやすい方法や断線しないような構造としなければならない。

電極の物性に関しては、オーミックコンタクトも考慮しなくてはならない。今後どの程度の特性が得られるか未知であるが、非常にクリティカルな場合は問題となる。また、二端子法や四端子法等による測定の際に、極性変更による電気的特性の変化があってはならない。

くし形電極は、複数の電極対構造もつのが一般的であ

り、この理論的解析もほぼ確立¹⁰⁾し、電子デバイスへの応用も多数商品化されている。これらの実績に基づき、(100)面だけではない配向性の方向制御・材料形状・電極構造・電極取り付け位置・応力方向・電界方向等をからめた検討を行う予定である。

2)他の電気的特性試験と解析

今回は、インピーダンス・位相の周波数依存性及び応力対電圧発生について試験を行った。今後、誘電体共通項としての誘電率、誘電正接、電界対分極のヒステリシスカーブの測定や、電気機械結合係数等の材料定数の計算と解析手法を検討する。そして、圧電性以外の応用の可能性(セレンディピティ:serendipity)をさぐる。

3)インテリジェント性の応用試験

応力検知機能を組み込んだスマート・ストラクチャーセラミックスの構築を実現する試みとして、例えば旋盤によるA1加工時の状態を、バイトホルダーに搭載した本試作セラミックス薄膜材料で検出し、A1破壊時にフィードバック制御して旋盤を停止する等の応用試験を行う。この場合、正常加工時と異常時との判定基準が鍵となる。すなわち、一般に、誘電体材料の圧電特性は、応力が印加された瞬間と、逆に応力を除去する瞬間にのみ、材料内部の分極した+及び-電荷に距離に比例した変化が起こり、電流が流れるしくみとなっている。従って、A1に薄膜材料が単に固定されているだけでは、電圧は発生しない。それと、A1異常時に対する電圧発生時の応答速度が課題となる。すなわち、応答速度が遅いと、A1破壊は勿論のこと、旋盤までも破壊する恐れさえ出てくる可能性がある。

そこで、この試験と平行して、①じわじわと漸的に力を加えた場合の電圧応答性、②一定の応力印加状態から、応力除去時の電圧応答性③常時振動する応力に対する圧電応答性及び④これらの組み合わせ試験が必要である。また、時間を考慮すると、前述の①~④で、瞬時にやった場合とゆっくりやった場合で比較する必要がある。従って、力の静的試験と動的試験、交流的か直流的か、瞬時か長時間かを試験して、総合的な判断をしなければならない。

4)電磁ノイズ環境を考慮した試験

今回は、空調をコントロールした常温・常湿[湿度20±15°C、湿度(65±20)%]の研究室で試験を行った。しかし、昨今のマイクロプロセッサ類を実装した電子機器の増加が原因で、電磁環境は悪化の一途を辿っている。例えば電子機器から発生する電磁波ノイズが、測定器や供試材料へ侵入して測定誤差を生じる可能性が大いにある。そこで、例えば電磁波ノイズの侵入を防止するために、供試材料・テストフィクスチャ・測定器をシールド材で遮へいすることが考えられる。これで、もし問題があれば、当センター設置の電波暗室で試験することによ

り、電磁波ノイズのみならず、電源ノイズもより効果的に防止可能となる。また、材料の電極とテストフィクスチャ間に使用するリード線は、クロストーク防止も含めたシールド付き高周波用ケーブルを用いるとか、装置や応力用球体を第一種単独接地に接続するとかの注意も必要である。今後、特に30MHz~1GHzの高周波帯域では、電磁波ノイズの影響を考慮した測定が必要になってくると予想される。

4 おわりに

今回、Ti(C,N)系微粉体で加工したセラミックス基板上に、反応性スパッタリング法によってC軸配向したAlN薄膜を形成したセラミックス薄膜材料において、圧電性の有無を確認するために、インピーダンス・位相の周波数特性試験及び応力印加試験を行った。その結果、有意と思われる圧電特性が得られた。今後この結果に基づき、各種のパラメータの組み合わせで、最適な測定条件を考案し、安定性や再現性のある測定システムを構築する。また、実用性を考慮した性能評価の試みや、測定結果の解析手法について検討する。

謝 辞

本研究は、通商産業省中小企業庁を事業主とし、九州工業技術研究所がオルガナイザーとなり、福岡県、佐賀県、長崎県、熊本県、及び鹿児島県が共同で、平成5年度から7年度にわたり、「広域共同研究」(指定課題:スマート・ストラクチャセラミックスに関する研究/分担課題:応力検知能力を有する構造用セラミックス材料に関する研究)というテーマで行われた事業の研究報告のひとつであります。

本研究を遂行するにあたり、行政の立場から御指導・御助言いただきました九州通商産業局商工部技術振興課角中正博課長補佐、及び原回高之係長に厚くお礼を述べ

ます。また、終始一貫して有益な御指導・御助言を賜りました工業技術院九州工業技術研究所無機複合材料部長渡辺忠彦博士、及び同部秋山守人博士の両名には、心より謝意を表します。さらに、電子計測の観点から適切な御指導・御助言をいただきました佐賀大学理工学部電気工学科教授信太克規博士には、衷心から感謝申し上げます。

文 献

- 1)柳田博明. "セラミックスの化学". 東京, 丸善, 1993, 259P.
- 2)柳田博明. "ファイナ・セラミックス". 東京, 講談社, 1993, 184P.
- 3)柳田博明. "新素材の拓く世界". 東京, 日本放送出版協会, 1994, 121P.
- 4)泉 弘志. "電子セラミックス". 東京, 誠文堂新光社, 1992, 174P.
- 5)佐賀県工業技術センター. "平成6年度広域共同研究第7回共通課題検討委員会検討資料". 佐賀, 佐賀県工業技術センター, 1994年12月1~2日. p. 12.
- 6)中 重治, 早川 茂. "電子材料セラミックス". 東京, オーム社, 1986. p. 62-70.
- 7)CQ出版社. "トランジスタ技術". 東京, CQ出版社, 1995. Nov. p. 336-338.
- 8)CQ出版社. "トランジスタ技術". 東京, CQ出版社, 1995. Jul. p. 344-346.
- 9)岡崎 清. "セラミック誘電体工学". 東京, 学献社, 1983. p. 361-368.
- 10)児島俊弘. "弾性表面波工学入門". 東京, ニューセラミックス, Vol. 6. No. 7. p. 31-73 (1993).

編集委員

井戸泰男

原口隆一 中川 優
富重定三 末永知子
宮川隆二

熊本県工業技術センター研究報告 第34号, 1996

編集・発行 熊本県工業技術センター
〒862 熊本市東町3丁目11-38
TEL 096-368-2101 (代表)
FAX 096-369-1938

印刷所 (有)米田印刷
〒862 熊本市坪井6丁目594
TEL 096-345-0150
FAX 096-345-2628
