

材料加工時の熱エネルギー変換に着目した
「機能性評価法」と「パターン認識 MTS 法」による
生産工程設計・開発に関する研究

2020年3月

當摩 栄路

概 要

材料加工時の熱エネルギー変換に着目した 「機能性評価法」と「パターン認識 MTS 法」による 生産工程設計・開発に関する研究

21 世紀に入って、市場のグローバル化が急速に進みものづくり企業においては、グローバル市場における競争力を確保するため、従来よりも高いレベルの品質管理と生産性が求められる時代に突入した。ものづくりの基盤となる技術マネジメントの重要な柱である生産技術力には、「高品質(Q)」と「低コスト化(C)」および「高生産性(D)」の 3 つの要素が必要不可欠である。しかし、多くの品質特性を一つずつ潰していく「もぐらたたき」的な開発方法が行われているため、開発期間の短縮が図りにくく市場クレームが後を絶たないといった問題が生じている。これらの問題・課題に対して、技術的な方法論である品質工学手法（タグチメソッド）に基づいた新たな品質評価法の提案と実践事例での検証により、生産工程に馴染む品質工学手法の展開と高度化に取り組んできたことが本研究の背景にある。

品質工学における「機能性評価法」は、「パラメータ設計法」をベースに生産技術分野で活用されている評価手法であるが、材料加工分野の開発・設計現場では、加工システムの本来あるべき理想機能状態を設定する標準的適用方法が明確化されていないのが現状である。その結果、材料加工分野の最適化ニーズを満たす効果的な活用法に関する研究成果の確立が課題とされている。

そこで本論文では、材料加工技術分野の様々な課題に対して、従来の品質工学手法に以下の 2 つの方法を提案し、実践事例に適用して検証した。

1. 生産加工技術分野において、材料加工時の強度安定と生産加工プロセス開発の最適化時に、熱エネルギー変換に着目した「新たな機能性評価法」を適用した方法
2. 品質検査分野において、高信頼性を確保し、高度な判定・判別を実行するパターン認識 MTS 法に「融合評価特性と閾値設定法」を適用した方法

第 1 章では序論として、品質工学手法の概要と適用プロセスを解説後、材料加工技術分野における熱エネルギー変換に着目した「理想機能関数の新たな線形的定義」による機能性評価法の提案及び実践事例での検証概要（第 2 章から第 4 章）と、品質検査分野におけるパターン認識 MTS 法への新たに“融合評価特性”と“閾値設定法”の適用（第 5 章）を提案し、それぞれの方法の有効性について述べている。

第 2 章では、溶接接合時に付加される溶込み熱エネルギーに着目した機能性評価による溶接加工プロセスの最適化に対する提案の検証事例として、自動車用 AT（オートマチックトランスミッション）部品製造工程を事例に取り上げた。本事例では、自動車部品の電子ビーム溶接加工プロセスの最適化に関して、溶接接合時に付加される溶込み熱エネルギーの影響による接合部の溶接深さを特性値とした理想機能を新たに設定し、それを間接的に評価することで、溶接強度の最適化に關

る品質工学における機能性評価法（静スカラー特性）適用の有効性について検証した。検証成果として、溶接強度と寸法精度の最適化により溶接接合部のひずみ量が大幅に削減され、「高品質（Q）ドラム変形量 54%削減」, 「低コスト化（C）製造原価 20%削減」, 「高生産性（D）可動率 20%向上」を同時に達成することができた。

第 3 章では、樹脂流動に関わる溶融エネルギーに着目した機能性評価による樹脂成形加工プロセスの最適化を提案し、プラスチック部品射出成形加工プロセスを検証事例に取り上げた。本事例では、樹脂強度の最適化について、金型内の樹脂充填密度の管理機能（樹脂流動に関わる溶融エネルギーの入出力関係）に着目し、材料力学的な考察による“評価特性値である樹脂充填密度の安定化を理想機能とした機能性評価法（静スカラー特性）”を提案し、その有効性について検証した。検証成果として、樹脂射出成形品の強度の安定化には、管理機能である金型内の樹脂充填密度の均一化が重要であることを明らかにした。

第 4 章では、誘導加熱エネルギーの入出力の直線性に着目した機能性評価によるモータ部品生産プロセスの最適化に対する提案の検証事例として、汎用モータ部品（ロータ・シャフト）加工プロセスを事例に取り上げた。本事例では、従来工法に代わる汎用モータ用ロータ・シャフトの高周波誘導加熱による新たな焼嵌め工法を考案し、高周波誘導加熱エネルギーの入出力の直線性に着目し、“ロータ・シャフト挿入時のシャフト径と芯振れ量の入出力関係（線形的比例関係）を理想機能とした機能性評価法（動ベクトル特性）”の適用を提案した。入力信号を変えて出力の直線性を解析し、これを動特性のエネルギー比型 SN 比で評価することで、よりロバストネス（頑健性のある）な新たな工法の最適化に関する有効性について検証した。検証成果として、誘導加熱エネルギーの直線性を理想機能とした「機能性評価（動ベクトル特性）」の適用により、「芯振れ量 56%低減（高品質）」と高周波誘導加熱技術の採用による「生産可動率 10%向上（高生産性）」, 省人化とエネルギー損失低減化による「製造原価 30%削減（低コスト化）」を同時に達成することができた。

第 5 章では、品質検査分野において、高信頼性を確保し、高度な判定・判別を実行するパターン認識 MTS 法に“融合評価特性と閾値設定法”を新たに適用した方法による品質検査プロセスの最適化に対する提案の検証事例として、モーターファン部品の検査工程を事例に取り上げた。製造現場におけるモーターファンの品質検査は、検査員による官能検査法が主流であるが、この検査法では、ファンの微妙な放射音（音圧）や振動の違いを正確に診断するために、多くの経験を必要とし、検査員の体調や環境の変化によっては、正常/異常の判定にばらつきが発生する。これら「品質・生産性・コスト」に関わる技術課題の解決には、モーターファンの音圧・振動レベルを定量的かつ正確に判別診断できる解析法の開発が求められている。本事例では、品質工学手法の中で検査事象の正常/異常判定を行う「パターン認識 MTS（マハラノビス・タグチ・システム）法」を採用し、最適な情報を合理化するために、SN 比（ばらつきの尺度）を MD（マハラノビス距離）に融合した新たな“融合評価特性”と正常/異常判定の基準値である“閾値設定法”適用の有効性について検証した。検証成果として、波形パターン形状情報からの特徴量を解析する「パターン認識 MTS 法」が、一般的な特徴解析法（周波数分析法など）に比べて判別分析精度の高いことが確認できた。さらには、検査工程を官能検査法から「パターン認識 MTS 法」を適用した自動化へ可能性の検証により、「判別分析法の精度向上（高品質）不良率 30%削減」と「検査工程の自動化（高生産性）可動率 20%向上」および「検査員の省人化（低コスト化）製造原価 30%削減」同時達成の目途がたった。

第 6 章では、本論文で提案した“品質評価・解析手法”を振り返り、総括と品質工学の今後の展望について論じている。本論文で提案する“品質評価・解析手法”は、実用上要求される「高品質 (Q)」と「低コスト化 (C)」と「高生産性 (D)」の三大要素を同時に克服することが可能な手法であり、工業製品の品質評価を始め、様々な科学的分野に広く応用できると考える。

Fig. II-1 に本論文の全体構成をまとめたフローチャートを示す。

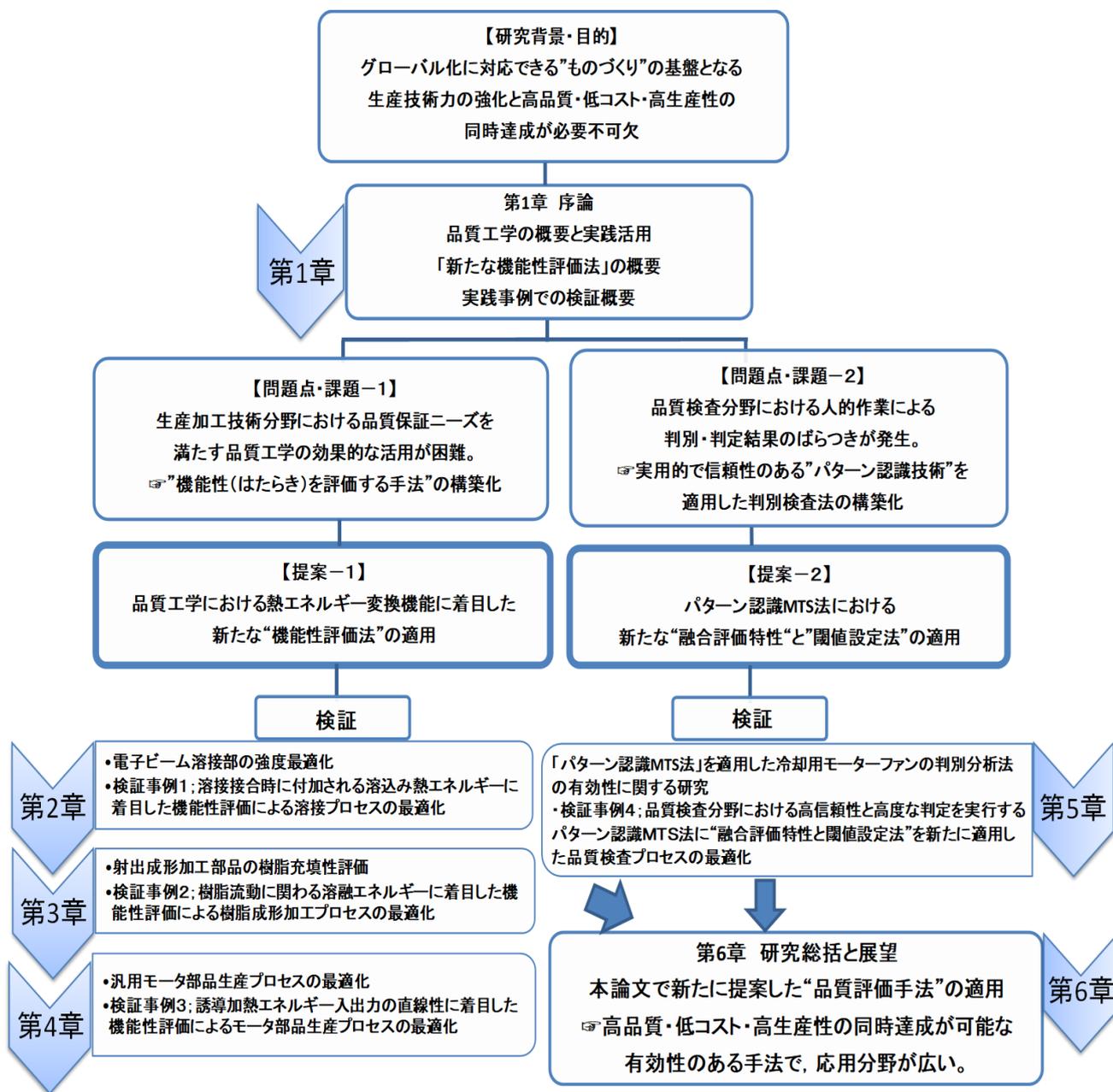


Fig. II-1 本論文の全体構成フローチャート

目 次

概要	[II-IV]
図のリスト	[VII-X]
表のリスト	[XI-XII]
本 文	
第 1 章 序論	[1-27]
1.1 品質工学の概要と実践活用	1
1.2 「新たな機能性評価法」の概要	16
1.3 実践事例での検証概要	22
参考文献	25
第 2 章 電子ビーム溶接部の強度と寸法特性の最適化	[28-45]
2.1 検証事例(1)	28
2.2 研究課題と概要	28
2.3 はじめに	29
2.4 研究の目的	30
2.5 溶接プロセスの概要と課題	31
2.6 新たな理想機能の設定	33
2.7 研究成果	40
2.8 今後の研究課題	43
参考文献	44
第 3 章 射出成形加工部品の樹脂充填性評価	[46-58]
3.1 検証事例(2)	46
3.2 研究課題と概要	46
3.3 はじめに	46
3.4 樹脂射出成形加工プロセスの概要	47
3.5 材料力学的考察による新たな理想機能の設定	49
3.6 樹脂の充填性評価	50
3.7 研究成果	56
3.8 今後の研究課題	56
参考文献	57

第4章	汎用モータ部品生産プロセスの最適化	[59-81]
4.1	検証事例(3)	59
4.2	研究課題と概要	59
4.3	従来工法の課題と新たな工法の考案	60
4.4	研究目的と検証内容	61
4.5	実験システム	62
4.6	理想機能の設定と動特性評価	68
4.7	研究成果と今後の研究課題	79
	参考文献	80
第5章	「パターン認識 MTS 法」を適用した冷却用モーターファンの判別分析法の有効性に関する研究	[82-113]
5.1	検証事例(4)	82
5.2	研究課題と概要	82
5.3	検証の目的	83
5.4	解析原理	84
5.5	新たな提案と解析手順	89
5.6	判別方法	91
5.7	特徴量の抽出	95
5.8	放射音波形の測定	96
5.9	放射音波形データの解析結果	100
5.10	振動波形の測定	104
5.11	研究成果と今後の課題	109
	参考文献	111
第6章	研究総括と展望	[114-116]
6.1	研究の成果と総括	114
6.2	品質工学の展望	115
	謝辞	116

図のリスト

図番号	タイトル	ページ
II-1	本論文の全体構成フローチャート	IV
1-1-1	品質工学の体系	3
1-1-2	パラメータ設計による改善のイメージ	5
1-1-3	基本機能	6
1-1-4	基本機能におけるばらつきとかたより	7
1-1-5	パラメータ設計の手順	11
1-1-6	最適条件の決定方法	13
1-1-7	要因効果図 (SN 比 η)	14
1-1-8	要因効果図 (感度 S)	14
1-2-1	「新たな機能性評価法」の概念	17
1-2-2	理想機能関数の線形的定義	18
1-2-3	静スカラー特性	19
1-2-4	動ベクトル特性	20
2-3-1	Components in clutch drum	29
2-3-2	Clutch pack power transmission mechanism	30
2-4-1	Weld joint of drum and hub	31
2-5-1	Outline of welding machine	32
2-5-2	After the welding is distorted	32
2-6-1	Distortion generation mechanism	33

2-6-2	Ideal function	34
2-6-3	Response graph	38
2-7-1	Histogram of Current	42
2-7-2	Histogram of Optimum	42
3-3-1	Resin status of automobile pulleys	47
3-4-1	Machine model	48
3-4-2	Injection molding machine	48
3-5-1	Pulley sectional view	49
3-5-2	Relations of ideal function	50
3-6-1	Response graph	54
4-3-1	Rotor core and Shaft	60
4-3-2	Inferior quality	60
4-5-1	Shrink fitting System	62
4-5-2	Bobbin and Coil	63
4-5-3	LCR meter	63
4-5-4	Relation of Coil turns and Inductance	64
4-5-5	Principle of Induction Heating	64
4-5-6	System configuration of high frequency induction heating device	68
4-6-1	Ideal Function	68
4-6-2	Response graph	73
4-6-3	Factor effect diagram	75

4-6-4	Comparison of variation	78
5-4-1	Conceptual drawing the MTS	85
5-5-1	Relationship between the number of items according to χ^2 distribution and threshold	90
5-6-1	Distribution of squared	91
5-6-2	Distribution of MD	92
5-6-3	Relationship between degrees of freedom and χ^2 distribution	94
5-7-1	Variation and abundance	96
5-8-1	Fan shape	97
5-8-2	Test fan	97
5-8-3	Test fan	98
5-8-4	Recording system	98
5-8-5	Waveform data	99
5-9-1	MD calculation results of normal products	100
5-9-2	Effectiveness analysis results	101
5-9-3	MD calculation results after analysis	101
5-9-4	MD calculation results of each sample fan	102
5-9-5	Effectiveness analysis results	103
5-9-6	MD calculation results of each sample fan	103
5-10-1	Overview of automatic rotary oscillating device	104
5-10-2	Schematic of automatic rotary oscillating device	105

5-10-3	Acceleration level of axial direction with angle of oscillation 15°	106
5-10-4	Acceleration level of radial direction with angle of oscillation 15°	107
5-10-5	MD calculation results of each angle of oscillation	108
5-10-6	Effectiveness analysis results	108
5-10-7	MD calculation results of angle of oscillation 45°	108

表のリスト

表番号	タイトル	ページ
1-1-1	誤差因子（ノイズ）の分類	4
1-1-2	$y = \beta M$ に基づいて取得されるデータ	8
1-1-3	L18 直交表	10
1-1-4	L18 直交表に割り付ける制御因子	13
1-1-5	再現性の確認（事例1）	15
1-1-6	再現性の確認（事例2）	15
1-2-1	理想機能関数の線形的定義一覧	21
2-6-1	Control and Noise factors level	35
2-6-2	Assignment to orthogonal table	35
2-6-3	Experimental data and SNR / SENS	37
2-6-4	SNR estimation	39
2-6-5	Reliability	39
2-6-6	Confirmation experiment data	40
2-6-7	Reproducibility of gain	40
2-7-1	Process capability index	41
3-6-1	Control factors level	51
3-6-2	Noise factors level	51
3-6-3	L18 Orthogonal array	52
3-6-4	S/N ratio and Sensitivity	53

3-6-5	Estimated SN ratio and Sensitivity	55
3-6-6	Reliability	55
4-6-1	Various factors	69
4-6-2	Data form	70
4-6-3	Table of level	72
4-6-4	Orthogonal array (L9)/Experimental results	73
4-6-5	SN ratio and Sensitivity, Calculation process	74
4-6-6	Optimum condition	75
4-6-7	Optimum results	76
4-6-8	Reliability confirmation of L9 experiment	76
4-6-9	Confirmation experiment data	78
4-6-10	Reproducibility of confirmation	78
4-6-11	Improvement rate of SN ratio gain for BM condition	78
5-4-1	Unit data	86
5-4-2	Normalized data	87
5-8-1	Specification of fan	97
5-8-2	Specification of fan	98

第 1 章 序 論

1.1 品質工学の概要と実践活用

1.1.1 はじめに

品質工学は、田口玄一博士によって開発された技術評価の方法で、欧米では「タグチメソッド」と呼ばれている。システム機能のばらつきを効率的に評価することで、システムの品質を最適化する技術の体系である。品質工学は"戦略"と位置づけられ、技術における全ての研究開発に対する有用な効率化を推進する方法論といえる [1.1]-[1.3]。その中心的手法である「パラメータ設計」を、技術者が考案した技術の有効性を評価し、研究・技術開発段階に活用することを推奨している [1.9]-[1.11]。

最初に、品質工学とはなにか、品質工学の歴史的背景、品質工学の全体像について紹介し、以降、品質工学の中心的手法であるパラメータ設計を中心に、その概念や考え方について、事例をまじえて解説する。

1.1.2 品質工学とは

品質工学とは、田口玄一博士が「技術者にとっての仕事のやり方・考え方」として体系化したものである。品質工学の生みの親である田口氏は、1950年に電気通信研究所に入社し、実験計画法と出会ったのである。さまざまな実験因子と結果の精密な因果関係を追及する実験計画法は、田口氏による各種手法の考案にともなって、実験データの効率的解析手法として広く日本の産業界に普及していった [1.13]。

しかし、1960年代以降、田口氏は技術者の業務の効率化に重要性を感じ、開発設計における実験因子と結果の因果関係を求めるのではなく、「問題の発生を未然に防止し、あるべき姿に近づけるように源流で品質を作り込み、お客に届けられた製品が常に理想的な機能を発揮できる」という効率的開発設計手段の構築化を目指した。

品質工学は、「SN比(Signal-to-Noise ratio)」、「損失関数」、「直交表」の3つの要素を駆使し、研究開発した技術が市場または後工程で成立するか否かを推し量る評価手法である。具体的には、研究開発対象の基本的な「機能」を定義し、機能の安定性を測る誤差成分の影響度合いの尺度である「SN比」によって、その「機能」が誤差や外乱に対してロバスト（頑健）であるかどうかを評価する。品質工学では機能のばらつきによる

損失は、特性値（機能の出力）の目標値からのずれの大きさに比例するという「損失関数」でその整合性を評価する。また、任意の 2 因子（列）について、その水準のすべての組合せが同数回ずつ現れるという性質をもつ実験のための割り付け表である「直交表」との組み合わせによって、ロバスト性の高い設計因子の抽出と、パラメータの決定が容易になる。

田口氏が提唱する品質工学は、品質を金額で評価し、品質レベルの経済的評価を行う手法である。品質工学では、品質を製品が出荷後に社会に与える損失であるとして、次のように定義している [1.14]-[1.16]。

- ◆ 品質 = (機能のばらつきによる損失) + (使用コスト) + (機能に関係のない弊害項目による損失)

1.1.3 品質工学の概要と全体像

品質工学の体系を Fig. 1-1-1 に示す。「オフライン品質工学」, 「オンライン品質工学」, 「MT システム (マハラノビス・タグチ・システム, 以下 MTS 法)」の 3 つの手法で構成されており, 開発・設計段階での技術課題を扱うもので生産ラインとは別に技術者が行う仕事を体系化した「オフライン品質工学」と, 製造段階での工程管理が中心課題となりコストと品質の両方を考慮して仕事を行う内容を体系化した「オンライン品質工学」に大別することができる。特にオフライン品質工学では, 「パラメータ設計」と「許容差設計」が主な手法になる [1.23]。さらに, 従来の品質工学は, ハードウェアに関わる技術的課題を取り扱ってきたが, 近年, 現象を観察して, 多次元情報を総合的に判断するという情報処理の分野を扱う手法として, MTS 法が開発されている。MTS 法は, インドの統計学者であるマハラノビス氏が項目間の相関から導き出される距離を考案した「マハラノビス距離」を用いたデータ解析の手法であり, 「パターン認識を解く近似的な方法」技術といえる。特に, 地震や火災などの予測, 健康診断や外観検査等の画像パターン認識に広く応用され, 多数の成果事例が発表されている [1.7]-[1.8] [1.21]。

直交表は主にオフライン品質工学と MTS 法で用いられ, 損失関数はオンライン品質工学で用いられる。

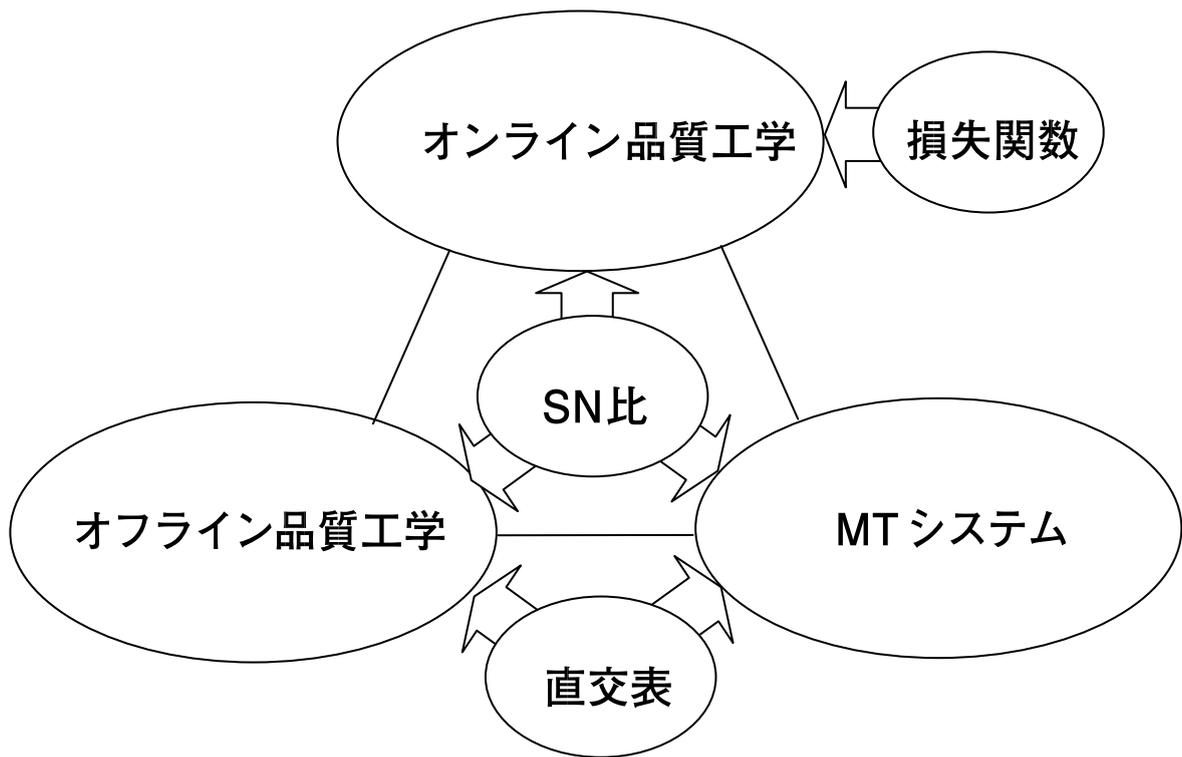


Fig. 1-1-1 品質工学の体系

1.1.4 パラメータ設計とは

パラメータ設計は、品質をばらつかせる誤差因子（ノイズ）に関わらず性能を安定化させ、ノイズに強い安定設計を行う方法である。すなわち、製品や部品が製造上の諸変数の影響を受けることなく、製品を容易にかつ低コストで設計し、出荷後の製品性能が、環境条件や劣化によって左右されないように改善するアプローチといえる。品質に問題のあるシステムとは、ノイズに対して出力が変動してしまう状態といえる。そして今述べようとしているパラメータ設計とは、ノイズに対して強い設計をしようとするものである。つまり、ノイズが存在しても出力が変動せずに一定になるようなシステムを開発・設計することを目指すのである [1.19] [1.25]-[1.27]。

パラメータ設計では、機能のばらつきに影響する要因を制御因子と誤差因子に分けて取上げる。制御因子（パラメータ）は、設計者の自由意志でその中心値や水準が決められる変数であり、最適水準が分かればそれを製品設計や生産設計に採用できる因子である。誤差因子（ノイズ）は、目的特性を理想値から大なり小なりばらつかせる原因の総称であり、3種類に大別したものを Table 1-1-1 に示す。

Table 1-1-1 誤差因子（ノイズ）の分類

内乱	システム内部で発生するノイズ。劣化などによる部品や材料のばらつき。
外乱	システム外部から加わるノイズ。環境の変動や客先・市場での使用条件のばらつき。
個体差	製品が作られたときにすでに存在する製品間のばらつき。

内乱とは、製品内部で発生するもので、経時劣化が代表例で部品の摩耗や加工液の劣化などがこれに相当する。外乱とは、温度・湿度などの環境の変動や客先・市場での使用条件などである。3つ目の個体差とは、製造誤差や製品間、部品間、材料間のばらつきである。これらのノイズは、生産や使用の場において、水準の指定も選択も不可能な因子である。そこで、ノイズによる外乱、内乱を抑えるためには環境の影響を補正する装置を取付けたり、劣化しにくい部品を使う等の対策をとることが一般的である [1.29]。

しかし、これらの対策は過剰機能、過剰品質に結びつき、すべてコストアップ要因になってしまう。つまり、過剰機能、過剰品質の根本的解決は、ノイズによるばらつきを減衰させることであり、このことが品質向上とコストダウンに結びつくことになる [1.35]。

従来型の実験では、これらのノイズをできるだけ排除してチャンピオンデータを得ようとする。一方、品質工学の実験では、ノイズを排除するのではなく、積極的に取り込んで実験するところに特徴がある。品質問題を抱えるシステムとパラメータ設計による改善のイメージを Fig. 1-1-2 に示す。

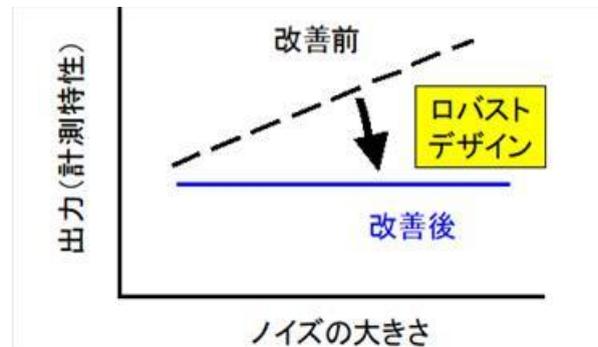


Fig. 1-1-2 パラメータ設計による改善のイメージ

Fig. 1-1-2 の改善前のシステム（破線）では、横軸のノイズの大きさに対して出力が右肩上がりに変化しているが、それ以外の変動パターンも想定される。パラメータ設計を実施することで、実線で示すように出力が変動しないシステムに改善することが可能となる[1.28]。

1.1.5 基本機能と SN 比

品質工学で扱う「機能」は、品質を達成するためのシステム（技術や機械装置）が持つ本質的な働きとしている。そして、システムの本来の働きが使用条件や環境条件にどれだけ影響されにくい、あるいはばらつきにくいを「機能性」と定義している。機能性を「製品やシステムの本来の働きはエネルギー変換である」とした考えに基づいて表現した関数を基本機能と呼ぶ [1.36]。基本機能は (1.1) 式で表現され、 M はシステムの入力、 y はシステムの出力、 β は感度である (Fig. 1-1-3)。なお、基本機能は目的機能と理想機能に大別される [1.6]。

$$y = \beta M \cdots \cdots \cdots (1.1)$$

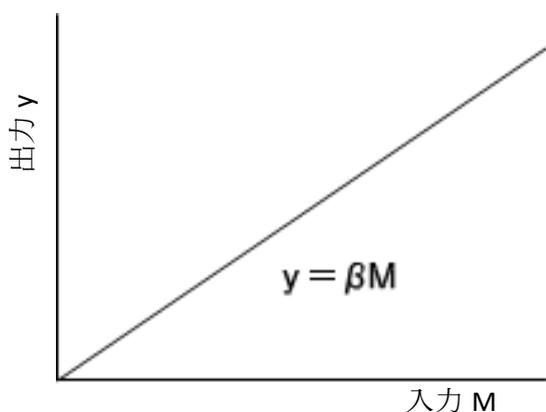


Fig. 1-1-3 基本機能

目的機能は、目的を達成するためのシステムのはたらきにより発現する顧客の望む製品の機能（品質特性）を指す。一方、理想機能は、システムの目的機能を実現するための技術的手段となるはたらきで、ニュートンの法則やオームの法則など科学的な法則を指す。

このため、品質工学の活用例の大半が目的機能を用いている。基本機能を実際の製品やシステムに当てはめると、使用条件によるノイズや外乱などの「ばらつき」の影響を受けるため、実際には (1.2) 式で表現される。

$$y = \beta M + e \cdots \cdots \cdots (1.2)$$

ここで、(1.2)式の第1項(βM)は出力の信号効果の大きさを、第2項(e)はノイズ効果の大きさを示し、製品やシステムを関数化して、基本機能を表現すると (1.3) 式になる。 A, B, C, \dots を制御因子（設計定数や試験条件）、 M を信号因子（基本機能の入力 M ）、 X, Y, \dots を誤差因子（制御できないばらつき）とした変数を持つ複雑な関数で示される。

$$y = f(A, B, C, \dots, M, X, Y, \dots) = \beta M + [f(A, B, C, \dots, M, X, Y, \dots) - \beta M] \cdots \cdots (1.3)$$

品質工学では、データの 2 乗和を信号の効果とノイズの効果に分解して SN 比を求めて、各種誤差原因の影響の大きさを評価するためにそれぞれの成分の効果の和に分解する。それらはすべて 2 次形式の分解であり、その内容が正しいかどうかとは関係がなく、数学的な公式として分解の数理の正しさを確認する。工学的には、計測値は出力の特性値として仕事量やエネルギーの平方根に比例することが要求される。品質工学上は 2 乗の成分がエネルギーを表し、その和が全出力として技術的・工学的な意味をもつことになる。

(1.3) 式の第 1 項は基本機能そのものであるが、第 2 項は基本機能との差のばらつきを示すことができる。基本機能の評価する場合、(1.3) 式の第 1 項と第 2 項を分離して考える必要があるが、第 2 項の関数が複雑なため、数学的に分離するプロセスが必要となる。これを二乗和の分解といい、概念的には (1.4) 式で表される。 S_T は全変動といい、(1.3) 式に含まれる項の全二乗和でもとめられる。

S_β は比例項の変動といい、 $S_{N \times \beta}$ は比例項の差の変動という。それぞれ、 $y = \beta M$ によってもとめられる変動である。 S_e は誤差変動といい、偶然誤差と $y = \beta M$ の非線形性が含まれている。

$$S_T = S_\beta + S_{N \times \beta} + S_e \dots\dots\dots (1.4)$$

(1.4) 式によって、システムの機能に有用な成分を S_β 、システムの機能に有害な成分を $S_{N \times \beta} + S_e$ と分解することによって、システムの機能 $y = \beta M$ の評価ができる。

品質工学では、有用な成分を分子に、有害な成分を分母とした比を SN 比と定義し、基本機能 $y = \beta M$ を SN 比で評価することで、システムの機能性評価を行なっている。一般的に知られている SN 比は、電気信号に対するノイズの比であるが、システムに関する概念として、システムに有用な成分を信号、有害な成分をノイズとしている。基本機能にノイズの概念を当てはめると、 $y = \beta M$ が複数描かれることになる (Fig. 1-1-4)。

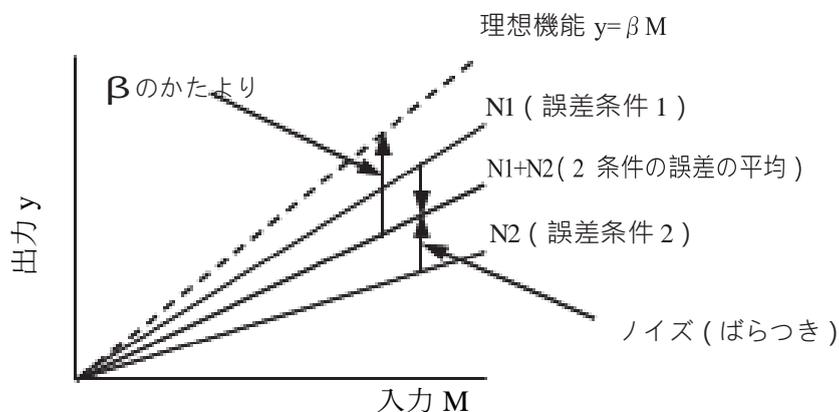


Fig. 1-1-4 基本機能におけるばらつきとかたより

Fig. 1-1-4 中の破線は理想線であり，3 本の実線はばらつきによって変化した結果である。SN 比は Fig. 1-1-4 の破線に対する実線との差（かたより）と，実線のばらつきを示す指標となる。品質工学では，SN 比での評価によって Fig. 1-1-4 に示される「ばらつき」を抑え，「かたより」を無くす段階を経てシステムの最適化を行なう。これを 2 段階設計という。

1.1.6 二乗和の分解

Fig. 1-1-3 に示す基本機能から取得されるデータの例を Table 1-1-2 に示す。Table 1-1-2 は，信号因子 M が 3 水準(M1～M3)，誤差因子 N が 2 水準(N1, N2)，線形式 L が 2 水準(L1, L2)の例である。二乗和の分解を (1.5) 式から (1.15) 式に示す。

Table 1-1-2 $y=\beta M$ に基づいて取得されるデータ

	M1	M2	M3	L
N1	y11	y12	y13	L1
N2	y21	y22	y23	L2

有効除数；

$$r = M1^2 + M2^2 + M3^2 \dots \dots \dots (1.5)$$

(1.5) 式の有効除数は，(1.9) 式以降の変動や分散の計算をより簡単にするために，単位変化量あたりの信号の変化に換算する値である。

線形式；

$$L1 = M1y11 + M2y12 + M3y13 \dots \dots \dots (1.6)$$

$$L2 = M1y21 + M2y22 + M3y23 \dots \dots \dots (1.7)$$

(1.6) 式，(1.7) 式の線形式は，最小 2 乗法で原点を通る直線の傾きの推定であり，L1 は誤差因子の条件が N1 のときの傾きで，L2 は誤差因子の条件が N2 のときの傾きである。

全変動；

$$S_T = y11^2 + y12^2 + y13^2 + y21^2 + y22^2 + y23^2 \dots \dots \dots (1.8)$$

(1.8) 式は，前述した全変動で Table 1-1-2 のデータにおける全体の傾向を示しており，全データの二乗和である。

比例項の変動；

$$S_{\beta} = (L1 + L2)^2 / (2r) \cdots \cdots \cdots (1.9)$$

(1.9) 式の比例項の変動は、信号 M を変化させたことによる出力 y の変化である。

比例項の差の変動；

$$S_{N \times \beta} = (L1^2 + L2^2) / (r - S_{\beta}) \cdots \cdots \cdots (1.10)$$

(1.10) 式の比例項の差の変動は、誤差因子による $y = \beta M$ の傾きの変化である。

誤差変動；

$$S_e = S_T - S_{\beta} - S_{N \times \beta} \cdots \cdots \cdots (1.11)$$

(1.11) 式の誤差変動は、誤差因子以外の誤差（偶然誤差や系統誤差）の影響を示す値である。

誤差分散；

$$V_e = S_e / 4 \cdots \cdots \cdots (1.12)$$

(1.12) 式は (1.11) 式の分散である。

総合誤差分散；

$$V_N = (S_{N \times \beta} - S_e) / (1 + 4) \cdots \cdots \cdots (1.13)$$

(1.13) 式は、全体の誤差を示す値である。

SN 比；

$$\eta = 10 \log [(S_{\beta} - V_e) / (2r)] / V_N \cdots \cdots \cdots (1.14)$$

感度；

$$S = 10 \log [(S_{\beta} - V_e) / (2r)] \cdots \cdots \cdots (1.15)$$

そして、これらの値から (1.14) 式の SN 比、(1.15) 式の感度がもとめられ、機能性の評価指標となる。

1.1.7 パラメータ設計の手順

品質工学では 2 段階設計を行なうにあたって、実験の効率化を図るためのツールとして、L18 直交表を用いる (Table 1-1-3)。

Table 1-1-3 L18 直交表

No.	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Table 1-1-3 の列が実験因子や設計定数などを当てはめる制御因子を示し、Table 1-1-3 の行がその組み合わせパターンを示す。L18 直交表の場合、組み合わせは 18 通りとなる。この表では、制御因子 A は、2 水準を割り付けることができ、直交表の行番号 No.1 から 9 が A1 となり、No.10 から 18 が A2 となる。制御因子 B から H も同様の見方をし、全体で 18 通りの組み合わせとなる。実験の組み合わせを直交表で計画し、Fig. 1-1-4 で示すばらつきを実験条件として、通常は 2 水準与え、 $y=\beta M$ の基本機能を評価するために、信号因子 M として通常 3 水準の入力を与える。これにより、実験数は $2 \times 3 \times 18$ の 108 通りとなる。

108 通りの実験データを用いて SN 比をもとめ、最終的に 2 段階設計を経て、ばらつきに対するロバスト性を確保する。この流れをパラメータ設計と呼び、具体的な手順を Fig. 1-1-5 に示す。直交表で割り付けたパラメータの妥当性は SN 比をもとめた後に示される要因効果図と確認実験によって示される。これを再現性という [1.31]-[1.33]。

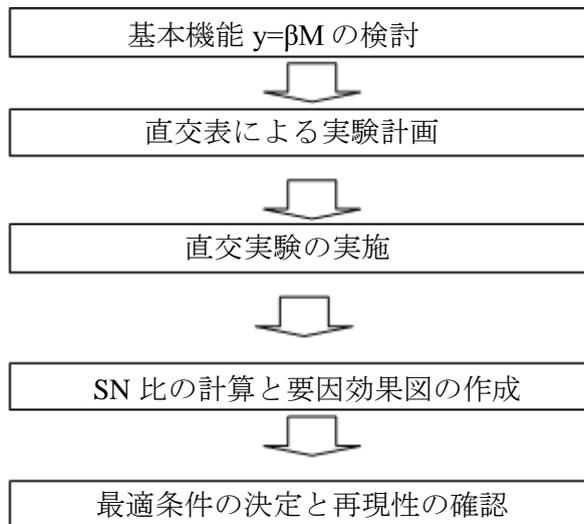


Fig. 1-1-5 パラメータ設計の手順

1.1.8 静特性と動特性評価

パラメータ設計には、製品の性質を表す静特性と動特性がある。静特性はさらに望小特性、望大特性、望目特性に分けられる。具体的な例で説明すると、「接着強度」は、「大きいほど望ましい」特性値(望大特性)である。もし強度が無限大であれば、もう壊れる心配はない。しかし、世の中に存在する様々な特性値には、騒音やエンジンの排ガス濃度あるいは軸受摩耗のように、「小さいほど望ましい」特性値(望小特性)、あるいは機械部品の寸法や抵抗素子の抵抗値などのように「目標とする値に近いほど望ましい」特性値(望目特性)がある。さらに、計測器のように、変化する入力値に対する指示値が「一定の直線(曲線)に乗るほど望ましい」特性値(動特性)がある [1.17]。

以上の事柄を簡単に整理すると、以下のようになる。

- ① 大きいほど望ましい特性値・・・・・・・・望大特性
- ② 小さいほど望ましい特性値・・・・・・・・望小特性
- ③ 目標値に近いほど望ましい特性値・・・望目特性
- ④ 入出力関係のある特性値・・・・・・・・動特性

品質工学では、特性値をこの4種類に分類している [1.18]。

以下にそれぞれの特性値に適用される SN 比の計算式を示す。SN 比：ばらつきを最小にするための評価尺度， n ：データの数， y ：各データの値

① 望大特性

$$SN比 : \eta = -10 \log \frac{1}{n} \left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \frac{1}{y_3^2} + \dots + \frac{1}{y_n^2} \right)$$

② 望小特性

$$SN比 : \eta = -10 \log \frac{1}{n} (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2)$$

③ 望目特性

$$SN比 : \eta = 10 \log \frac{\frac{1}{n}(S_m - V_e)}{V_e}$$

$$S_m = \frac{1}{n} (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n)^2$$

$$V_e = \frac{1}{n-1} (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2 - S_m)$$

④ 動特性

$$SN比 : \eta = 10 \log \frac{\frac{1}{n}(S_\beta - V_e)}{V_e}$$

[S_β (入力効果), V_e (誤差分散)の計算式は省略]

1.1.9 要因効果と最適化

表 1-1-4 は、L18 直交表に割り付けられる設定定数（制御因子と呼ぶ）の種類と数を示したものである。組み立て品の評価の場合には、8 種類の構成部品にそれぞれどのような性能の部品を使えば良いかを評価するために、それぞれの部品に 2 つまたは 3 つの水準を設定することができる。例えば、表 1-1-4 の A という部品に A1 という性能を持つ部品と A2 という性能を持つ部品のどちらの方が基本機能を発揮するかということを知ることができる。B という部品の場合には、B1, B2, B3 のいずれが基本機能を発揮するかということを知ることができ、以下、C~H も同様の評価が行なえる。そして、A~H のそれぞれで最適な水準が選択され、その組み合わせを最適条件とすることができる。その選択は、Fig. 1-1-7 (SN 比 η)、1-1-8 (感度 S) に示すような要因効果図によって各制御因子の主効果の傾向を把握することができる[1.12]。Table 1-1-4 に示す L18 直交表によって計画された実験データからもとめた SN 比、感度によって得られる。通常、最適条件の決定

方法は、Fig. 1-1-6に示すような要因効果図からの2段階設計法の考え方をを用いる。

まず第1段階でSN比が最大になる条件を選び、次に第2段階で、SN比の変化が少ない因子を使い、事前にシステム機能を定義した感度に対する考え方に基づいて要求に合うように、その水準を調整する。感度が無視できる場合は、SN比のみに着目して最適条件を決定することになる。尚、感度に対する考え方は、対象とするシステムの理想機能に近づけるように感度を調整する[1.34]。

Table 1-1-7の例では、ばらつきを抑える過程では、SN比の要因効果図で各因子のSN比の高い水準を選択し、A2B3C1D3E1F2G2H1が最適条件となる。新規開発の場合には、比較条件として最悪条件（Fig. 1-1-7からSN比の低い水準を選択してできた条件）を用い、改善事例の場合には、現行製品の条件を用いる。また、かたよりを無くす過程では、感度の要因効果図が用いられ、理想機能に近づけるように感度を調整する。

Table 1-1-4 L18直交表に割り付ける制御因子

制御因子	第1水準	第2水準	第3水準
A:	A1	A2	
B:	B1	B2	B3
C:	C1	C2	C3
D:	D1	D2	D3
E:	E1	E2	E3
F:	F1	F2	F3
G:	G1	G2	G3
H:	H1	H2	H3

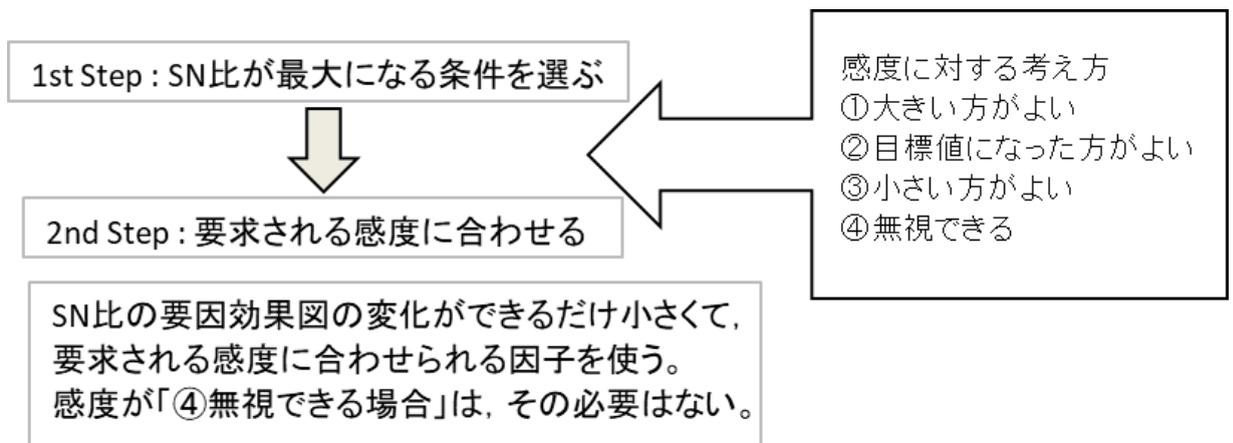


Fig. 1-1-6 最適条件の決定方法

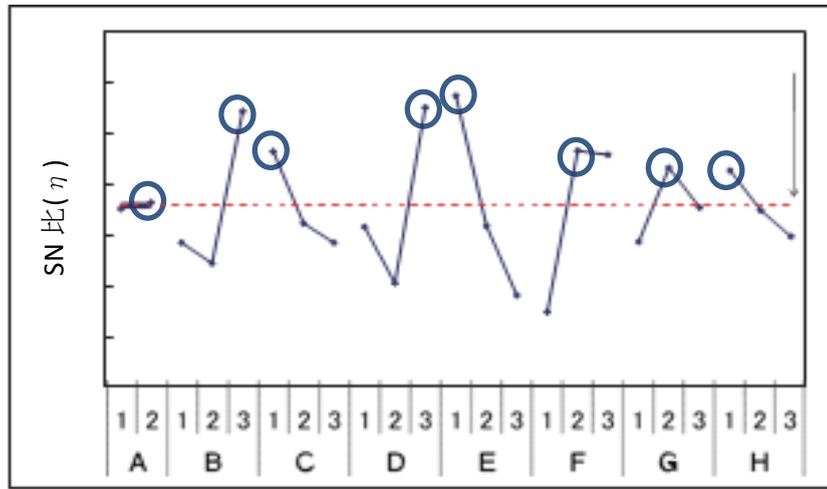


Fig. 1-1-7 要因効果図 (SN比 η)

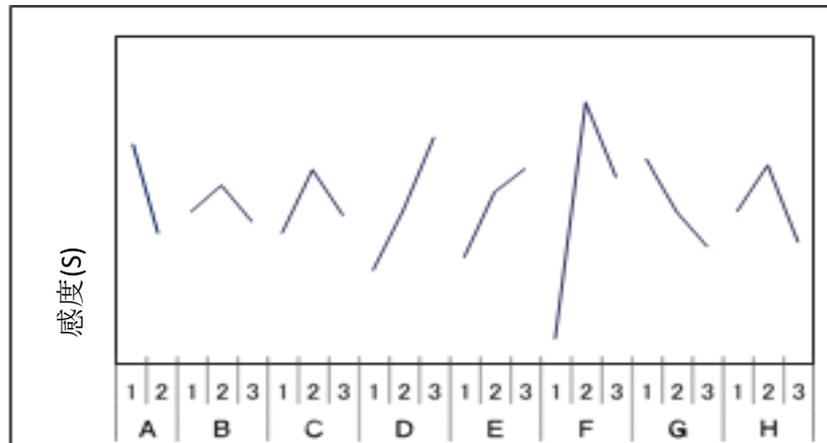


Fig. 1-1-8 要因効果図 (感度 S)

1.1.10 再現性の評価

パラメータ設計の妥当性評価は再現性の確認によって行なう。Fig. 1-1-7または 1-1-8によって選択された最適条件と現行条件（または最悪条件）を使って、再度実験を行なう。これを確認実験といい、実験によって得られた SN 比を用いて利得の差をもとめる。

利得とは、現行条件（または最悪条件）に対する最適条件の改善度のことである。要因効果図から推定した利得と、確認実験で得られた利得の差が再現性を示しており、Table 1-1-5のように、差が小さければ再現性が十分であり、Table 1-1-6のように、差が大きければ再現性は十分ではないと判断する。再現性が十分でない場合には、実験や計算に何らかの問題があることを示しているため、再検討する必要がある [1.37]-[1.38]。

尚、Fig. 1-1-7, 1-1-8の要因効果図で因子 Fのような第 2 水準に極値のある山形、谷形になる場合、利得の再現性が悪いことが多い。これは基本機能の考え方が悪い、誤差因子が適切でない、制御因子間の交互作用が大きいなどの原因が考えられ、実験結果の再現性が悪いことを実験段階で示していることを意味する。

Table 1-1-5 再現性の確認（事例1）（db）

	最適条件	現行条件	利得
推定	50.22	38.52	11.7
確認	48.53	37.78	10.75
差	1.69	0.74	0.95

Table 1-1-6 再現性の確認（事例2）（db）

	最適条件	現行条件	利得
推定	50.22	38.52	11.7
確認	31.37	37.78	-6.41
差	18.85	0.74	18.11

以上の流れで、製品またはシステムの機能性を評価し、使用目的、使用環境に応じた最適化を行なうことができる。

1.2 本論文で提案した「新たな機能性評価法」の概要

品質工学における「機能性評価法」は、「パラメータ設計法」をベースに生産技術分野で活用されている評価解析手法であるが、材料加工分野の開発・設計現場では、加工の本来あるべき理想機能状態を設定する標準的適用方法が明確化されていないのが現状である。その結果、材料加工分野の最適化ニーズを満たす効果的な活用法に関する研究成果の確立が課題とされている [1.20]-[1.24]。

従来からの設計開発で製品を評価する際には、ユーザとの取り決めで決まる製品の仕様値を「特性値」としてそのまま計測し、その良し悪しで製品を評価する方法が活用されている。また、設計定数を決定する場合には、特性値の平均値が目標値と一致するように設計定数を定めることが最適化であるとされてきた。この過程には 2 つの問題点が存在する。

1 つ目は、仕様が製品の機能を表現していない場合が多いことと、仕様値をそのまま特性値として評価する場合に複数の特性値が存在し、全ての特性値を同時に満足するような設計定数を定めることが非常に困難であることである。

2 つ目の問題点は、設計定数の決定に際し、ばらつきを評価していないことである。仕様で決められている実験条件は、ある特定（標準）の条件であって、仮にその時点での出力が目標値に一致したとしても、使われる条件が異なれば出力も変化するからである。従来型「機能性評価法」の活用により、手順通りに解析・評価を行えば、概ね結果は得られる。しかし、材料加工時の入出力関係の考え方や入力・出力の取り方次第で大きく評価結果に影響を及ぼすため、目的とする機能を満たす最適化が図れないという技術的問題点が多々存在する。それぞれの材料加工技術において、理想機能状態の的確な設定方法の構築化が課題である [1.30]-[1.32]。

従来型「機能性評価法」の手順と問題点・課題に対する「新たな機能性評価法」の概念について Fig. 1-2-1 に示す。

従来型「機能性評価法」を適用する際の理想機能状態の設定段階では、技術者が材料の破壊・欠損、ひずみ・曲げによる変形、密度変化や熱エネルギーに起因する寸法変形誤差など様々な物理量を計測特性値（出力値）として選定する。最終的には、材料加工に起因する条件パラメータ（入力）と計測特性値（出力）の特性評価により最適化を図る。

しかしながら、実践的には対象とする加工技術の多様化・複雑化や技術者の経験不足等に起因する、適切な計測特性値の選定が難しいという問題点・課題が挙げられる。

そこで、これらの問題点・課題に対し本論文で提案した概念は、「材料加工時の強度安定化と加工プロセスや工法開発の要因系に関わるエネルギー変換機能（普遍的なエネルギー原理）に着目し、「理想機能関数の新たな線形的定義」と「計測特性選定の標準化による機能性評価法の確立」である。

従来型「機能性評価法」の手順

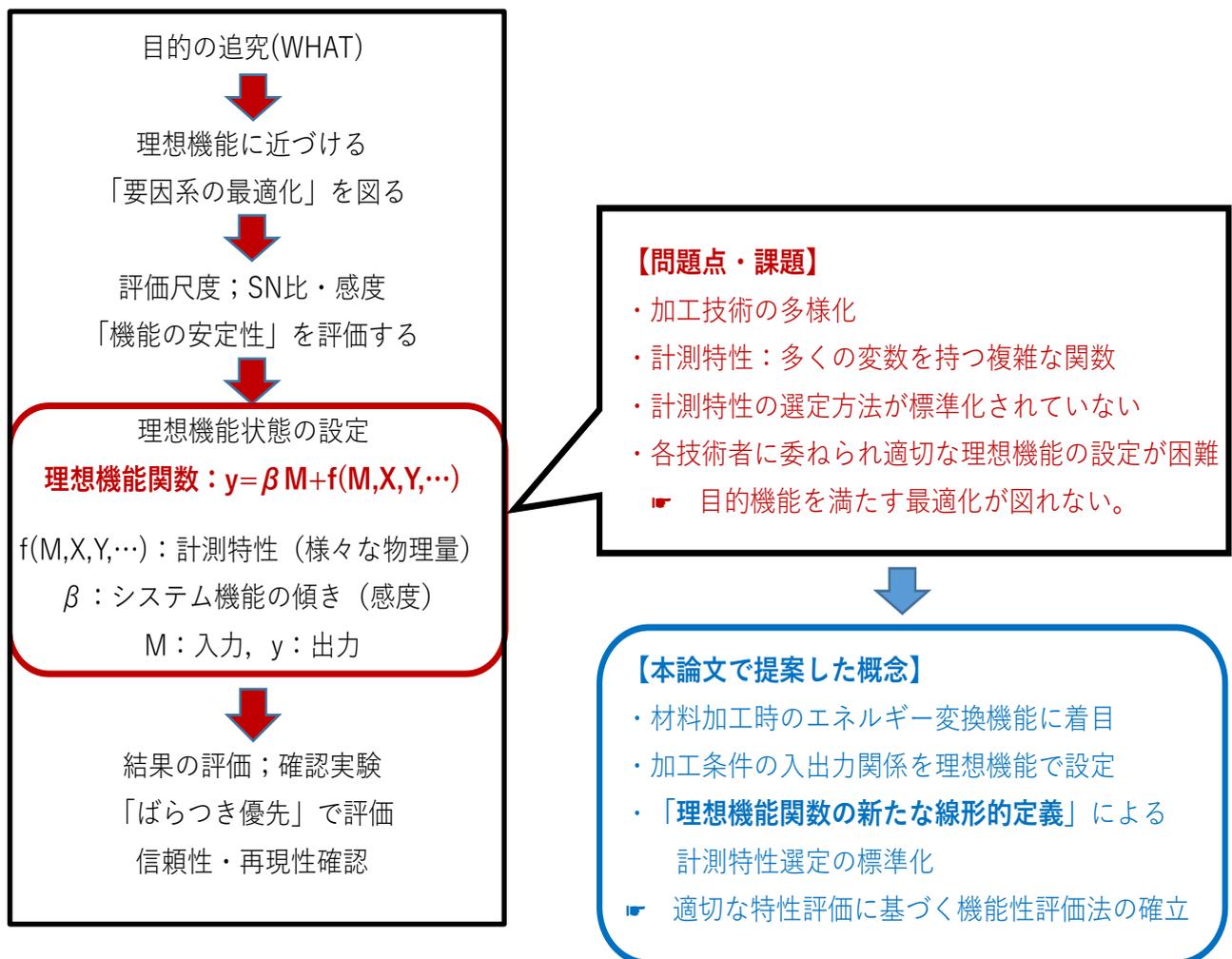


Fig. 1-2-1 「新たな機能性評価法」の概念

● 「理想機能関数の新たな線形的定義」

【入出力が線形関係にある場合】

多くのシステム技術の理想機能は、入力の変化に対して出力が直線的に変化するのが理想である。特に材料加工時には、システムにある機能をさせるには信号という入力エネルギーが必要であり、またその機能を乱すエネルギー（ノイズなど）が存在する[1.39]。

したがって、システムの全出力特性値（全仕事量）はエネルギー又は仕事量に比例しなければならない。また、材料加工システムにおいては、入力がゼロでも技術の原理上出力がゼロにならないものが存在する。

そこで本論文では、入出力の関係を表す理想機能関数が熱エネルギー変換に伴う線形的な関係になることに着目し、以下の関係式で定義する。（Fig. 1-2-2）

$$Y = \alpha X + C \quad (1.2.1)$$

Y ; 出力（計測特性値）， X ; 入力（熱エネルギーを含む加工条件パラメータ）
 α ; 線形的な入出力関係を表す比例定数， C ; 任意の計測特性定数

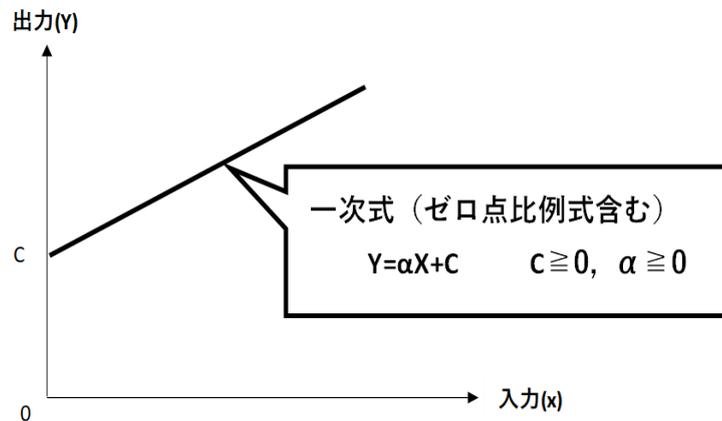


Fig. 1-2-2 理想機能関数の線形的定義

【入出力が非線形関係にある場合】

入力に対して出力が非線形に変化する場合の理想機能関数は、変数変換により線形関係に置き換えることが可能である。たとえば、出力 y が入力 x に対して A を定数として、 $y = A \times e^{\beta x}$ の関係を持つことを理想とする場合、両辺の対数をとれば、

$\log(y) = \log(A) + \beta x$ となり、 $\log(y)$ を新変数 Y とみなせば、 $Y = \beta x + \log(A)$ となり、線形関係の場合の基準点比例式が適用できる。非線形関係の入出力の多くは物理現象によ

るものであり、変数変換により線形関係に置き換えることができる。

1.2.1 材料加工時の強度安定の最適化に関する理想機能関数の定義

材料の破壊・欠損，ひずみ・曲げによる変形，密度変化などの熱エネルギー変換に起因しない静的スカラー量（方向性を持たない物理量）を出力値として選定した場合は，次式で定義できる。（Fig. 1-2-3）

・入力： $X \geq 0$

・線形的比例定数（理想状態）： $\alpha = 0$

（∵ 熱エネルギー変換に起因しない静的スカラー量の出力は一定）

・任意の計測特性定数： $C > 0$

（∵ 入力 $X = 0$ ， $C = 0$ → 出力（計測値） = 0 は成り立たない）

・出力： $Y = \alpha X + C = C$ （一定値） (1.2.2) … 静スカラー特性

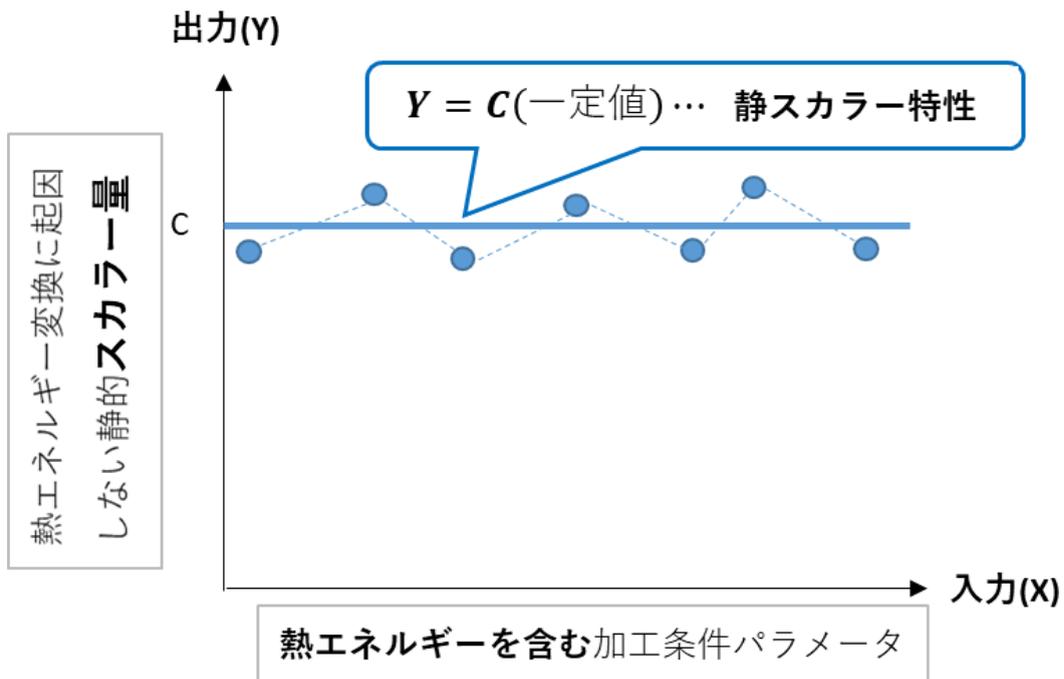


Fig. 1-2-3 静スカラー特性

1.2.2 生産加工プロセス及び工法開発の最適化に関する理想機能関数の定義

材料の加工プロセスや新たな工法開発における材料変形による寸法誤差，熱変形などの熱エネルギー変換に起因する動的ベクトル量（方向性を持つ物理量）を出力値として選定した場合は，次式で定義できる。（Fig. 1-2-4）

・入力： $X \geq 0$

・線形的比例定数（理想状態）： $1 \geq \alpha > 0$

（ \because 熱エネルギー変換に起因する動的ベクトル量の出力は変動,理想状態 $\alpha = 1$ ）

・任意の計測特性定数： $C = 0$

（ \because 入力 $X = 0$, $C > 0$ \rightarrow 出力（計測値） > 0 エネルギー保存則に反する）

・出力： $Y = \alpha X + C = \alpha X$ （変動値）（1.2.3） \dots 動ベクトル特性

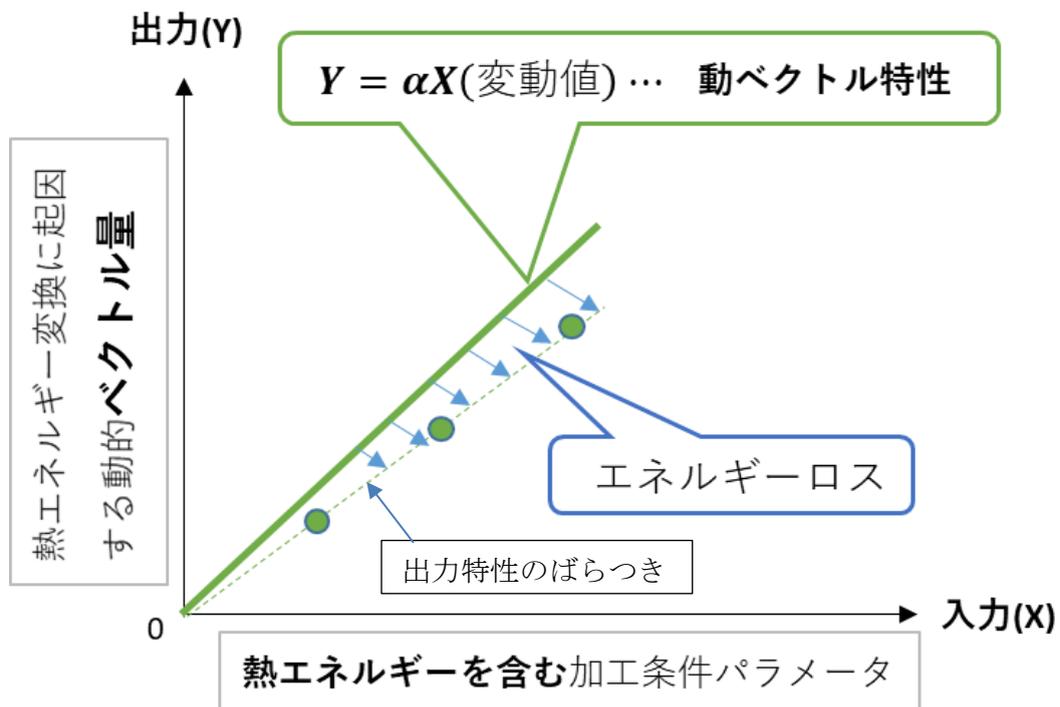


Fig. 1-2-4 動ベクトル特性

Table 1-2-1 に本論文で提案した理想機能関数の線形的定義の一覧表を示す。

Table 1-2-1 理想機能関数の線形的定義一覧

材料加工時の最適化パターン	出力値 (計測特性値)	任意の 特性定数	線形的 比例定数	出力特性の 定義式	特性評価	検証事例
材料の 強度向上・安定化	ひずみ・曲げによる 変形, 密度変化など	$C > 0$	$\alpha = 0$	$Y = \alpha X + C = C$ (一定値)	静スカラー特性 田口式SN比	第2章 第3章
生産加工プロセス・工法の開発	材料変形による 寸法誤差, 熱変形など	$C = 0$	$1 \cong \alpha > 0$	$Y = \alpha X + C = \alpha X$ (変動値)	動ベクトル特性 エネルギー比型SN比	第4章

1.3 本論文の提案に対する実践事例での検証概要

本節では、生産加工技術分野における「新たな機能性評価法」と、品質検査分野における『パターン認識 MTS 法』への「新たな融合評価特性と閾値設定法」を実践事例に適用した検証概要について述べる。

1.3.1 電子ビーム溶接部の強度安定化に関する最適化（第2章 静スカラー特性）

近年の電子ビーム溶接の適用事例を見渡すと、高品質な溶接が要求される原子力あるいは宇宙関連の部品に加え、自動車や航空機部品などの重ね継手やインロー形状の突合せ、あるいは部分溶け込みなどの溶接にも適用されている。一方で、電子ビーム溶接強度に関しては厚板の残留応力・変形挙動に関する研究報告[2.31]（菅哲男らによる、「電子ビーム溶接継手における残留応力特性」に関する研究）はこれまでにいくつかあるものの、自動車部品に適用される薄板の突合せや部分溶け込み溶接時の挙動に関してはいまだに不明な点が多い。また、生産性指標の3要素である「高品質(Q)」と「低コスト化(C)」および「高生産性(D)」(QCD)に関わる溶接強度と寸法特性の安定化に対する溶接加工条件の最適化に関する系統立てた研究事例はない。そこで本事例では、溶接接合時に付加される溶込み熱エネルギーの影響による接合部のひずみ量（静的スカラー量）を特性値とした理想機能を設定し、溶接強度と寸法精度に影響を及ぼすエネルギーの特性値を評価する機能性評価法「静スカラー特性」の適用を提案した。

1.3.2 射出成形加工部品の充填性評価（第3章 静スカラー特性）

プラスチック製品は身の回りに多く存在し、その種類や用途は多種多様である。それらのプラスチック製品の殆どが射出成形という技術によって製造されているが、射出成形技術において金型寸法と成形品が同じにならないという問題がある。その原因の一つとして、金型内に樹脂が均一に充填されない点が挙げられる。プラスチック製品の充填性について、成形品の寸法精度により評価した例（櫻井基樹らによる、「MTシステムによる射出成形品の均一充填性評価」に関する研究 [3.19]）はあるが、樹脂の充填ムラなど内部についての評価技術に関する研究が重要な課題とされている。従来から、樹脂の流動挙動に関わる評価法が確立されていないことから研究事例は極めて少なく、特に樹脂流動に関わる溶融エネルギーの入出力関係で評価した事例はない。そこで本事例では、溶融エネルギーの影響による樹脂の充填密度（静的スカラー量）が特性値として充填性評価に密接に関係することに着目し、材料力学的な定義により、それを理想機能とした

機能性評価法「静スカラー特性」の適用を提案した。

材料力学的な考察により樹脂部品の許容応力を以下のように定義した。

$$\text{Allowable stress : } \sigma = M/Z = K \cdot \rho \quad (1.3.1)$$

M : Moment of force, Z : Section modulus

K : Proportional factor, ρ : Resin filling density

許容応力は、荷重と寸法形状が一定の条件のもとで、断面係数と力のモーメントで決まり、強度の指標を示す許容応力と樹脂充填密度の線形的な比例関係が成立する。

本事例では、この定義に基づき樹脂充填密度 ρ のばらつき度合を安定化させることが樹脂強度の最適化には有効であることを検証した。

1.3.3 汎用モータ部品生産プロセスの最適化（第4章 動ベクトル特性）

モータの主要部品であるロータコアとシャフトの嵌合過程で圧入方式が採用されているが、圧入時にコアシャフトの芯振れという品質問題が発生する。従来から圧入工法の最適化や工法そのものの見直しに関する研究がなされているが、未だ QCD に関わる最適な工法は確立されていない。そこで本研究では、圧入工法に代わる新たな工法として“高周波誘導加熱方式”による焼嵌め工法を提唱した。高周波誘導加熱は、焼入れ、溶解、ろう付けなど産業において様々な用途に利用されているが、近年は生産の自動化、高速化や省電力化のニーズに加え、誘導加熱では加熱対象の形状の複雑化、材料の多様化から、加熱技術において高度な処理が要求されている。しかしながら、生産プロセスに適用する際には、加熱対象の形状、材料に合わせた最適な加工条件を設計する必要がある。本事例では、高周波誘導加熱による焼嵌め工法の最適化にアプローチし、誘導加熱エネルギーに起因するシャフトの芯振れ量（動的ベクトル量）を特性値とし、入出力信号の線形的な関係を理想機能と設定した機能性評価法「動ベクトル特性」の適用を提案し、エネルギー比型 SN 比・感度の算出によりその有効性について検証した。

1.3.4 『パターン認識 MTS 法』への融合評価特性と閾値設定法の適用（第5章）

モノづくりの生産工程における品質検査（外観検査含む）は、ほとんどが人間（検査員）による官能検査法が主流である。検査員の体調や環境変化の影響により判定にばらつきが発生するという問題が存在し、定量的かつ自動的に判別可能な解析手法の開発が求められている。「パターン認識技術」は、人間による判断や予測といった情報処理を、コンピュータに置換える技術である。

文字認識や指紋認証などの、身近な実用化例もあるが、コンピュータにとっては、“パターン認識”は今なお大きな技術課題である。その課題解決のために、情報処理技術を応用した多次元情報を取扱うことができる新しいパターン認識の方法として、「MTS 法」が考案された。MTS 法は、情報処理の生産性向上を目的とした方法論であり、品質工学で最も新しい研究分野である [1.4]-[1.7]。

何らかの手段により得られた各種の情報からの特徴を抽出し、パターン認識する手法であり、その経済的な情報の選択までを行う。従来のパターン認識では、認識したい異常の集団を中心に特徴を抽出する方法が主流で、いくつかの特徴量はそれらの高度な数理計算結果に基づきパターン認識する方法で、解析には多大な工数が必要である。

一方、MTS 法は、正常集団を中心にその基準点と単位量を決め、一つの評価特性（マハラノビス距離、以下 MD と記す）と判別の基準となる閾値の設定により、判別分析（正常/異常の）することで、従来の手法に比べてより効率的で、精度の高い判別が可能であるという特徴がある。しかしながら、パターンを認識できる特徴量を全て抽出して都度 MD を計算することは決して合理的ではない。また、閾値の設定法については、統計的な面からあまり研究されておらず、初めは閾値を「4」という数値に決めただけのものであった[5.1]（立林和夫らによる、「入門 MT システム」）。従来からいくつかの方法（兼高らによる、「 χ^2 （カイ二乗）分布を用いた方法」、中津川・大内らによる、「ガンマ分布を用いた方法」、松田らによる「F 分布を用いた方法」[5.20] [5.27] [5.28] [5.50]）が提案されているものの、これら分布のどれが優れているかの研究が進んでいないために、実践現場では担当技術者の課題であるとされているのが現状である。

そこで本事例では、パターン認識に必要な情報と不要な情報を選択し、最適なパターン認識可能な情報に合理化するために、SN 比を MD に融合した“新たな評価特性（有効特性解析）”の適用を提案した。また、閾値の設定法については、統計学的に MTS 法で推奨されている“MD の 2 乗は χ^2 （カイ二乗）分布に従う” [1.8]という裏付け根拠について、独自の数理的な証明をすることで、“ χ^2 （カイ二乗）分布を用いた MTS 法の閾値設定法”の適用を提案し、それぞれの有効性について検証した。

参考文献

- [1.1] 長谷部光雄：開発設計現場で使う品質工学(1)信頼性は設計できる，日本ゴム協会誌，Vol.88, No.5, pp.172-177, (2015).
- [1.2] 長谷部光雄：開発設計現場で使う品質工学(3)信頼性の効率的な設計-1（パラメータ設計の解説-1），日本ゴム協会誌，Vol.88, No.8, pp.317-322, (2015).
- [1.3] 長谷部光雄：開発設計現場で使う品質工学(5)過剰品質の防止や安全の設計（損失関数），日本ゴム協会誌，Vol.88, No.12, pp.466-472, (2015).
- [1.4] 飯田憲一，畑沢賢一，鶴谷知洋：本道製造業における品質工学の導入に関する研究，北海道立工業試験場報告，No.304, pp.79-85, (2006).
- [1.5] 手島昌一：品質工学（タグチメソッド）の基礎，北海道品質工学研究会，pp.10-11, (2000).
- [1.6] 矢野宏：おはなし品質工学，日本規格協会，pp.56-57, (1990).
- [1.7] 長谷川良子：マハラノビス・タグチ(MT)システムのはなし，日科技連，pp.2-3, (2004).
- [1.8] 手島昌一：MTS法によるパターン認識，アングルトライ（株），pp.1-2, (2002).
- [1.9] 田口玄一：マネジメントのための品質工学－生産活動に対するマネジメントのための損失関数－，品質工学会誌，Vol.8, No.2, pp.5-11, (2000).
- [1.10] 田口玄一他：技術開発のための品質工学，日本規格協会，(1994).
- [1.11] 田口伸：“タグチメソッド：新たなるエンジニアリングパラダイム”，日本規格協会「標準化と品質管理」，Vol.46, No.5, pp.32-38, (1993).
- [1.12] 広津千尋：“要因分析と予測のための統計的アプローチ”，日本規格協会「標準化と品質管理」，Vol.46, No.10, pp.55-60, (1993).
- [1.13] 立林和夫：品質工学の実施を阻むもの，品質工学会誌，Vol.2, No.1, pp.14-21, (1993).
- [1.14] 戸田雅規，市川和愛：製造現場での品質工学活用による生産性向上，不二越技報，Vol.57, No.1, 通巻 122 号，pp.21-26, (2005).
- [1.15] 田口玄一：品質工学講座「開発・設計段階の品質工学」，日本規格協会，第1巻，(1988).
- [1.16] 田口玄一：品質工学講座「製造段階の品質工学」，日本規格協会，第2巻，(1989).

- [1.17] 戸田雅規, 嘉指伸一, 高木万佳, 松岡信一, 小野元久: 「加工エネルギー評価によるドリル研削加工の技術開発と生産性向上に関する研究」, 品質工学会誌, Vol.7, No.1, PP.50, (1999).
- [1.18] 戸田雅規, 市川和愛: 「エネルギー評価による最適加工条件の決定 (SN比評価による刃具寿命の延長)」, プラントエンジニア, Vol.31, No.8, pp.10, (1999).
- [1.19] 谷本勲: PPM時代の品質管理ー品質管理と品質工学ー, 品質工学会誌, Vol.20, No.1, pp.38-47, (2012).
- [1.20] 佐々木市郎: 量産工程への品質工学適用によるシナジー効果, 品質工学会誌, Vol.16, No.2, pp.35-42, (2008).
- [1.21] 菊池富男, 佐々木市郎: MTシステムによる不良流出撲滅の取組み, 品質工学会誌, Vol.14, No.1, (2006).
- [1.22] 新沼明, 佐々木市郎: 品質工学をベースとした“一発完動”の新製品開発, 品質工学会誌, Vol.16, No.5, pp.18-26, (2008).
- [1.23] 田口玄一: 「マネジメントのための品質工学 3.製造における品質水準の評価は金額で」, 品質工学会誌, Vol.7, No.4, pp.4-10, (1999).
- [1.24] 近藤史郎, 長谷部光雄: 「経営課題に対する品質工学からのアプローチ」, 第13回品質工学研究発表大会, No.9, (2005).
- [1.25] 今井力也, 小澤仁: 品質工学を用いた加工工程の最適化, リコーテクニカルレポート No.38, pp131-137, (2012).
- [1.26] 工藤啓治, 小島章裕, 青山公彦: 設計・開発プロセスにおける最適化設計とロバスト設計ーシックス・シグマによるロバスト設計の基本概念と適用, 計算力学講演会講演論文集, Vol.2002, No.15, pp.459-460, (2002).
- [1.27] 田口玄一: ロバスト設計のための機能性評価, 日本規格協会, pp.161-174, (2000).
- [1.28] 矢野宏: おはなし品質工学, 日本規格協会, (2001).
- [1.29] 矢野宏: 品質工学計算法入門, 日本規格協会, (1998).
- [1.30] 矢野宏: やさしいタグチメソッドの考え方, 日刊工業新聞社, (2003).
- [1.31] 長谷部光雄: ベーシックタグチメソッド, 日本能率協会マネジメントセンター, (2005).
- [1.32] 長谷部光雄: 技術にも品質がある, 日本規格協会, (2008).
- [1.33] 長谷部光雄: 開発現場で役立つ 品質工学の考え方, 日本規格協会, (2013).

- [1.34] 田口玄一，他：ベーシックオンライン品質工学，日本規格協会，pp.225-251，(2009).
- [1.35] 田口玄一，山本昌吾：品質工学講座「製造段階の品質工学」，日本規格協会，第2巻，pp.163-194，(2006).
- [1.36] 山田哲司，救仁郷誠：オンライン品質工学「検査設計」の複数工程への適用－複数検査工程における検査設計の提案－，品質工学会誌，Vol.22, No.1, (2014).
- [1.37] 畠山鎮：実業に即したオンライン品質工学導入の検討，品質工学会誌，Vol.12, No.2, pp. 50-55, (2004).
- [1.38] 椿広計，河村敏彦：設計科学におけるタグチメソッド，日科技連，(2008).
- [1.39] 當摩栄路：「品質工学概論」" Quality Engineering manual，日本技術士会学会誌 IPEJ Journal 2013, pp.16-19.

第2章 電子ビーム溶接部の強度と寸法特性の最適化

2.1 検証事例(1)

テーマ：溶接接合時に付加される溶込み熱エネルギーに着目した
機能性評価による溶接加工プロセスの最適化

2.2 研究課題と概要

自動車の AT（オートマチックトランスミッション）内部には、動力を伝達させるための部品が多く組み込まれている。変速にかかわる重要機能を有しているクラッチパック部品は、高い生産性と厳しい寸法精度要求から機械加工と熱処理工程を主な製造工法として採用している。溶接及び熱処理工程において、溶接強度不足によるドラム歯部熱変形量のばらつきという品質上の不具合が発生する[2.32]- [2.33]。

この品質問題の解決にあたり、本事例では、自動車部品の電子ビーム溶接加工プロセスの最適化設計に関して、溶接接合時に付加される溶込み熱エネルギーの影響による接合部の溶接深さを特性値とした理想機能を新たに設定し、それを間接的に評価することで、溶接強度の最適化に関する品質工学における“機能性評価（静スカラー特性）”適用の有効性について検証した。研究成果として、「高品質（Q）」、「低コスト化（C）」、「高生産性（D）」を同時に達成することができた。さらには、機能性評価法により抽出した最適な溶接加工条件の評価結果について、統計的管理手法である工程能力指数（工程の品質に関する能力のことで、品質基準を満たした製品を生産できる能力のこと）をヒストグラム化し、正規分布形（正常形）であることが検証できた。

2.3 はじめに

自動車のオートマチックトランスミッション内部には、動力を伝達させるための部品（クラッチディスク、シールリング、リターンズプリング、ピストン、インナースナップリング、キャンセルカバーなど）が数多く組み込まれている（Fig.2-3-1） [2.8]。

その中でも変速にかかわる重要な機能を有しているクラッチパック部品は、高い生産性と厳しい寸法精度の要求から、機械加工及び熱処理加工工程を主な製造工法として採用している。Fig.2-3-2に、クラッチパックの動力伝達メカニズムの概要を示す。

クラッチピストンに油圧を供給することにより、ディスク、メーティングプレートが押し付けられ、両者が締結すると動力を伝達する。油圧が抜けると、リターンズプリングによりピストンが押し戻され、解放状態になる。クラッチ圧の大きさに応じて 2 つの部材間に伝達するトルクを制御できる構造になっている [2.28]-[2.29]。

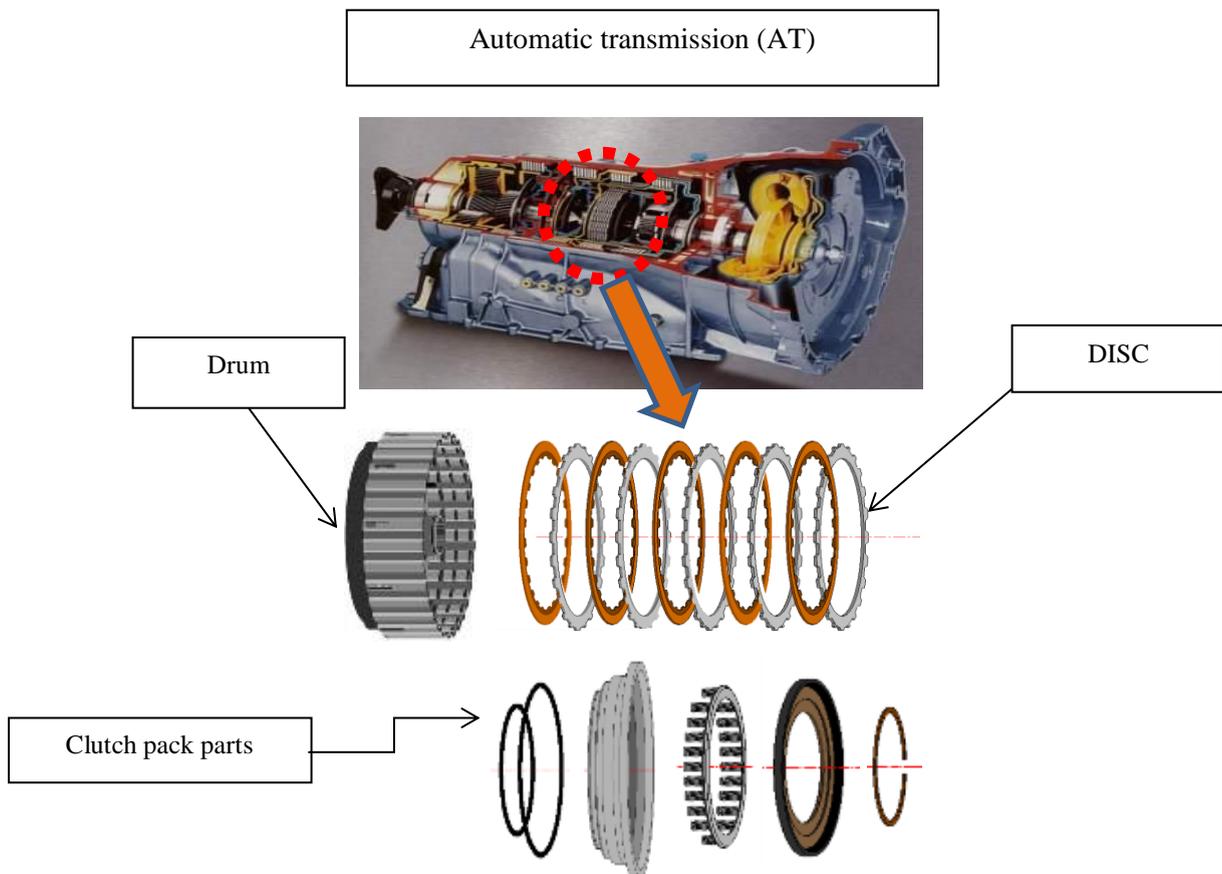


Fig. 2-3-1 Components in clutch drum

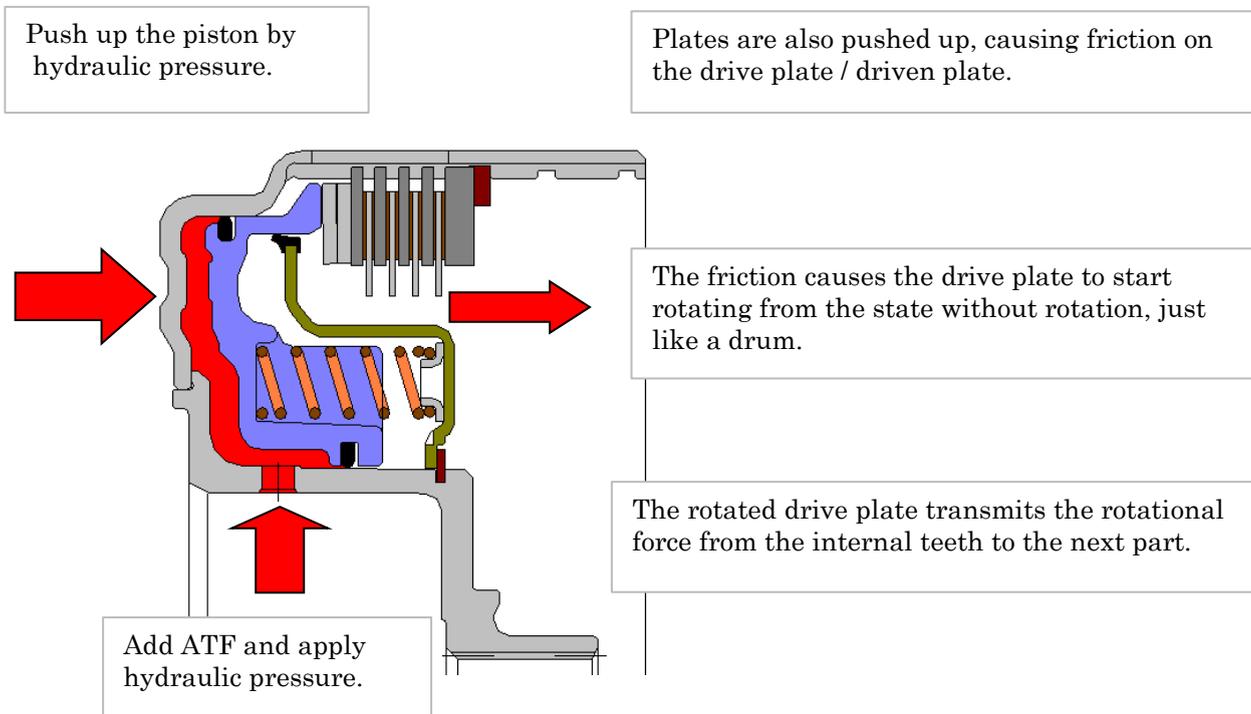


Fig. 2-3-2 Clutch pack power transmission mechanism

2.4 研究の目的

Fig. 2-4-1 に、クラッチドラム（ドラム）とシャフトハブ（ハブ）の接合概要図を示す。本研究の課題は、熱処理加工工程の中のドラムとシャフトハブの自動溶接加工工程（電子ビーム溶接）において、ドラムスプライン部歯幅形状の変形による寸法精度のばらつきと規格外れという品質機能上の不具合が発生することである [2.30]。

一般的なエンジニアリング・プロセスにおいて、材料や生産機械のばらつきなど、様々な条件のばらつきが発生する可能性がある。それらのばらつきに耐えうるロバストな製品加工条件の最適化が課題である。“生産現場のモノづくり”において、制約条件の中で理論値ぎりぎりのところで最適な値を追及して作られた製品は、条件のばらつきの影響を受け易い。その結果、不良率の高まりと、工程能力（定められた規格限度内で、製品を生産できる能力）の低下をもたらす。これらの品質問題を効率的に解決するには、ロバスト性のある最適加工条件の解析評価技術である『パラメータ設計』の実践が極め

て有効である [2.3]-[2.5]。

本研究の目的は、溶接接合時に付加される溶込み熱エネルギーの影響による接合部の歪量（変形量）を特性値とした機能性評価法（静特性）を用いて、クラッチドラム電子ビーム溶接加工条件の最適化を図り、歯幅変形量のばらつき削減と工程能力の向上により、生産現場における効率的な品質確保と高生産性及び低コスト化実現を検証することである。

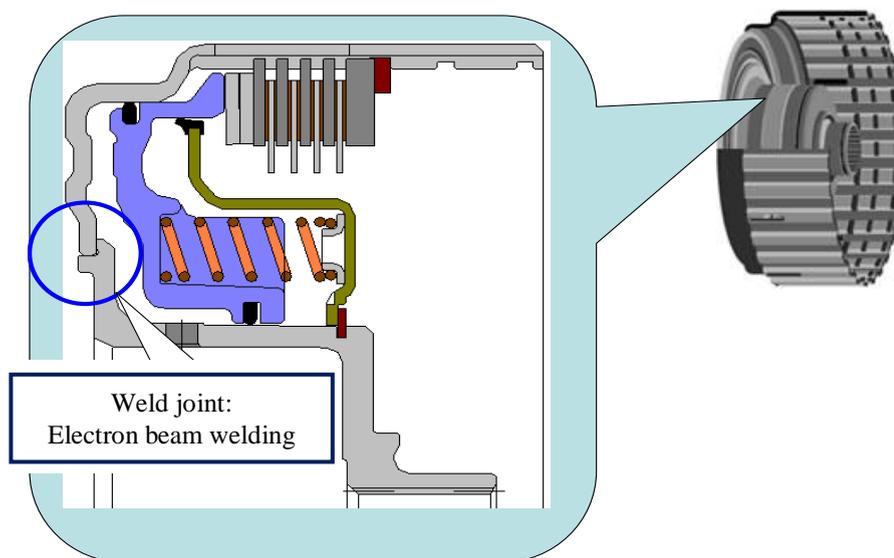


Fig. 2-4-1 Weld joint of drum and hub

2.5 溶接プロセスの概要と課題

クラッチパック部品の主な製造プロセスは、ドラムとハブの溶接接合（電子ビーム溶接）と表面改質処理（ガス軟室化処理）の熱処理工程を経て、パック機能部品の組立工程へと展開される。Fig. 2-5-1 に溶接工程設備（電子ビーム溶接機）の概要を示す。ドラムとハブの接合に溶接工法が採用される理由は、ドラムとハブの一体切削加工に比べて、コストメリットが大きいことが挙げられる。しかしながら、コストメリットはあるものの、品質確保を保証するために、製品形状や寸法の検査工程が必須となっているのが生産現場の抱えている重要課題となっている [2.22]-[2.24]。

電子ビーム溶接とは、真空中で発生させた高速の電子ビームの有するエネルギーを熱源として利用する溶接法である。溶接の幅に対して溶込みが非常に深くなる特徴がある。電子銃や母材を入れるための真空室を必要とするために、大形や長尺の構造物には適さない。制御メカニズムでは、電子ビームの放射・収束電流値、加工テーブル回転速度、ビーム放射角度など数種の設定モードが組み込まれている [2.1]-[2.2]。Fig. 2-5-2 に示すように、ドラムとハブの電子ビーム溶接接合時に負荷される溶け込み熱エネルギーの影

響により、ドラムにひずみが発生し、ドラム歯部の変形及び寸法規格外れという品質不具合が問題となる。特にひずみによるドラム歯幅寸法のばらつきが発生し、規格寸法の工程能力が不足してしまう。出荷検査において品質を確保すべく全数検査が必要となり結果として、製造コストの増加を招くことになる [2.15]-[2.16]。

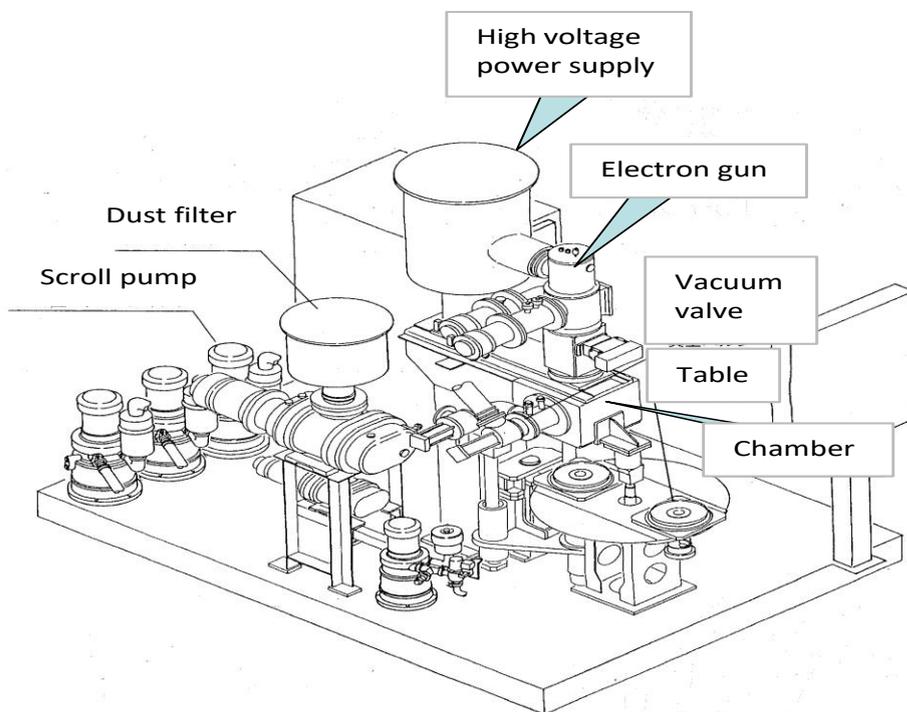


Fig. 2-5-1 Outline of welding machine

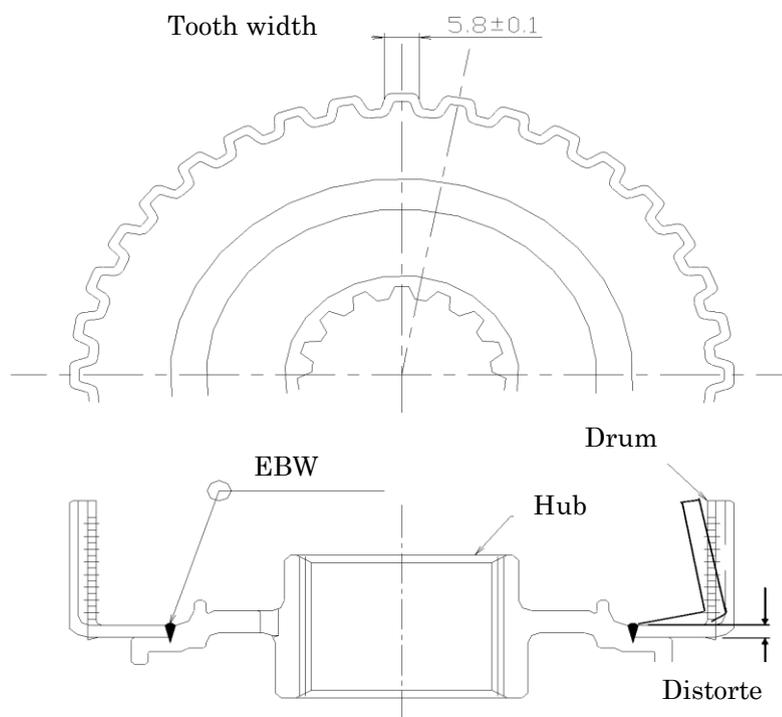


Fig. 2-5-2 After the welding is distorted

2.6 新たな理想機能の設定

本事例の理想機能を設定する目的は、ドラムとハブの電子ビーム溶接接合時に負荷される溶け込み熱エネルギーの影響による接合部のひずみ量低減化である。ひずみの発生要因である溶け込み熱エネルギー（ビーム出力と溶接速度により決定される）と溶接深さの関係式は以下の通りである [2.17]-[2.18]。

$$h_p \propto \frac{P}{\sqrt{V}} \quad (2.1)$$

溶接深さ： $h_p(mm)$

ビーム出力： $P(kW)$

溶接速度： $V(m/min)$

上式から、溶け込み熱エネルギーと溶接深さは比例関係であり、溶接深さの変化によりひずみが発生し、その結果ドラム歯部の変形が発生する。

溶接接合部におけるひずみの発生メカニズムについて、Fig. 2-6-1 に示す。溶接接合時に、溶け込み熱エネルギーの影響による溶接深さの変化によりドラムが反り上がるようにひずみが発生する。このひずみ量を極力小さくするには、ビード部の形状と溶接深さのばらつき抑制が重要であることに着目した。

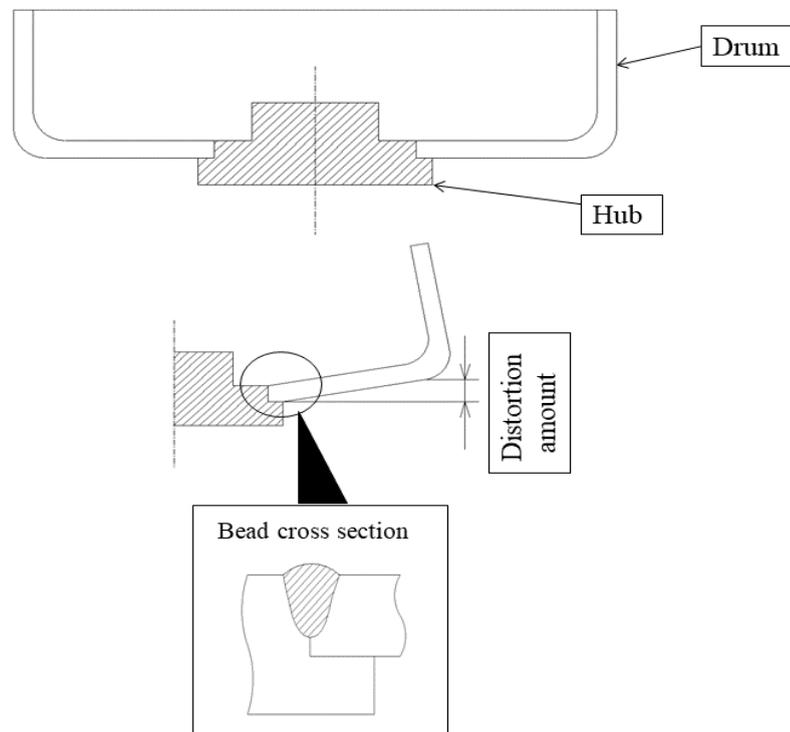


Fig. 2-6-1 Distortion generation mechanism

Fig. 2-6-2 に本事例の理想機能状態を示す。入力を溶け込み熱エネルギー負荷に関わる溶接条件パラメータとし、出力であるビード部の溶接深さ（スカラー量）を出力特性値として、出力が入力に対してばらつきが少なく、ある一定の目標値になることが理想機能状態と設定した。

本事例では設定した理想機能に基づき、静スカラー特性による機能性評価法の適用を提案し、ビード部の溶接深さの安定化と歪み量の削減に対する電子ビーム溶接加工条件の最適化について検証した。

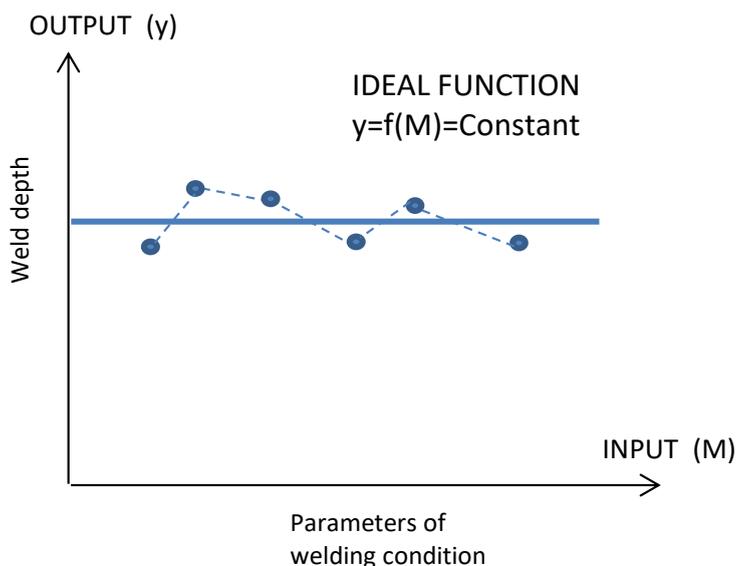


Fig. 2-6-2 Ideal function

Table 2-6-1 に本システムの各種因子と水準表を示す。制御因子(Parameters)は、電子ビーム溶接加工条件{ビームモード(Beam mode: A) , バネ荷重(Spring load: B), 第1テーブル回転速度(①Rotation speed: C), 第1テーブルビーム電流(①Beam current: D), 第2テーブル回転速度(②Rotation speed: E), 第2テーブルビーム電流(②Beam current: F), 角度幅(Angle: G), 収束電流(Convergent current: H)}を各水準に割付した。誤差因子(Noise factors)は、溶接後のドラム表面改質（表面硬度）の確保で条件が制限されることから、表面改質処理（GNP: ガス軟室化処理）の条件とした。この水準表から、実験計画を組むために最適化手法の統計ツールである「L18 直交表」を作成した。

Table 2-6-1 Control and Noise factors level

Parameters	Symbol	level 1	level 2	level 3	N1	N2
Beam mode	A	8	4	-	GNP con.1	GNP con.2
Spring load	B	small	medium	large		
①Rota. speed (rpm)	C	8	9.5	11		
①Beam current (mA)	D	35	40	45		
②Rota. speed (rpm)	E	8.5	10	11.5		
②Beam current (mA)	F	70	80	90		
Angle (degree)	G	35	40	45		
Converg. current (mA)	H	685	690	695		

2.6.1 実験計画・実験

L18 直交表を用いて、内側に制御因子、外側に誤差因子を割付けた実験計画表を Table 2-6-2 に示す。実験回数は直交表の規模によって決まり、直交表の左端に示された実験 No.によって表わされる。本システムの実験回数は $18 \times 2 = 36$ 回で、横方向の上段は割付けられた制御因子の種類を表わす。その下に羅列された数値がそれぞれの制御因子の水準を表わす。直交表を使用するメリットは、実験回数の削減である。直交表 L18 を使用しない場合は、 $2^1 \times 3^7 = 4,374$ 通りの実験回数が必要になる [2.6]-[2.7]。

Table 2-6-2 Assignment to orthogonal table

No.	A	B	C	D	E	F	G	H
1	8	small	8	35	8.5	70	35	685
2	8	small	9.5	40	10	80	40	690
3	8	small	11	45	11.5	90	45	695
4	8	medium	8	35	10	80	45	695
5	8	medium	9.5	40	11.5	90	35	685
6	8	medium	11	45	8.5	70	40	690
7	8	large	8	40	8.5	90	40	695
8	8	large	9.5	45	10	70	45	685
9	8	large	11	35	11.5	80	35	690
10	4	small	8	45	11.5	80	40	685
11	4	small	9.5	35	8.5	90	45	690
12	4	small	11	40	10	70	35	695
13	4	medium	8	40	11.5	70	45	690
14	4	medium	9.5	45	8.5	80	35	695
15	4	medium	11	35	10	90	40	685
16	4	large	8	45	10	90	35	690
17	4	large	9.5	35	11.5	70	40	695
18	4	large	11	40	8.5	80	45	685

2.6.2 SN比と感度の算出

機能性評価では、実験データに基づいて「SN比」という評価の尺度を求めて、最終的に「要因効果図」という図表で効果の有無を判断して、最適条件を求める。

SN比は、ロバストネスの評価指標であり、有効成分と有害成分の比をとった信号対雑音比として算出する。安定性の尺度として特性値（出力）のばらつき、つまり平均値からずれている大きさを表し、その数値が大きい方が望ましいことになる。

本研究では、溶接後のドラム変形量の削減が課題で、特性値である溶接深さがある一定の目標値になることが理想であるため、静スカラー特性「望目特性」でSN比を算出した。望目特性のSN比および感度の算出方法について以下に説明する。

実験で得られた n 個のデータ y_1, y_2, \dots, y_n から、有効成分の平均値 \hat{m} の 2 乗と有害成分の標準偏差 $\hat{\sigma}$ の 2 乗である分散 $\hat{\sigma}^2$ を求めてその比を対数変換して 10 倍することで SN 比を計算する。パラメータ設計におけるデータ解析は、2 乗和の分解という数学を基礎としている。ここでは 2 乗和の分解に従い、データの持つ全変動（全 2 乗和）を一般平均の変動と誤差変動に分解する式を以下に示す。

有効成分の平均値 \hat{m} の 2 乗 \hat{m}^2 :

$$\hat{m}^2 = \frac{1}{n}(S_m - V_e) \quad (2.2)$$

有害成分の標準偏差 $\hat{\sigma}$ の 2 乗である分散 $\hat{\sigma}^2$:

$$\hat{\sigma}^2 = V_e = \frac{S_e}{f_e} \quad (\text{有害成分の自由度: } f_e = n - 1) \quad (2.3)$$

全変動 S_T ;

$$S_T = y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2 \quad (\text{全変動 } S_T \text{ の自由度: } f = n) \quad (2.4)$$

一般平均の変動 S_m ;

$$S_m = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \quad (\text{変動 } S_m \text{ の自由度: } f = 1) \quad (2.5)$$

誤差変動 S_e ;

$$S_e = S_T - S_m \quad (\text{誤差変動 } S_e \text{ の自由度: } f = n - 1) \quad (2.6)$$

誤差分散 V_e ;

$$V_e = \frac{S_e}{(n - 1)} \quad (2.7)$$

SN ratio η ;

$$\eta = 10 \log \frac{\hat{m}^2}{\hat{\sigma}^2} = 10 \log \frac{1}{V_e} \frac{(S_m - V_e)}{n} \quad (2.8)$$

実験対象とするシステムの出力の大きさを「感度」と呼ばれる指標で表す。対象とするシステムから出力される特性値をエネルギーとして捉え、有効と有害に分解する考え方に基づいており、平均値からのずれが有害に相当する。平均値 \hat{m} の2乗をデシベル(db)の単位に対数変換して10倍した次式で算出される [2.25]- [2.27]。

静特性の感度 S ;

$$S = 10 \log \hat{m}^2 = 10 \log \frac{1}{n} (S_m - V_e) \quad (2.9)$$

望み特性の解析では、ロバストネス（安定性）の改善と出力のチューニング作業という2つのステップを経る。ロバストネス（安定性）の改善で、利用されるのが SN 比、出力のチューニングで利用されるのが感度である [2.10]-[2.14]。

Table 2-6-3 に、実験データと SN 比・感度の算出結果を示す。

Table 2-6-3 Experimental data and SN ratio / Sensitivity

	Output data		SN ratio (db)	Sensitivity (db)
	N1	N2		
	GNP.Con.1	GNP.Con.2		
1	7.4	6.7	23.06	16.95
2	3.3	1.7	6.42	7.49
3	2.0	0.7	2.19	1.46
4	2.5	3.6	11.72	9.54
5	4.0	6.9	8.17	14.41
6	2.2	1.0	4.85	3.42
7	22.4	23.8	27.36	27.27
8	6.4	8.6	13.57	17.41
9	6.1	7.8	15.18	16.77
10	8.1	8.6	27.46	18.43
11	12.2	14.1	19.79	22.36
12	3.5	3.6	34.01	11.00
13	7.1	10.5	11.11	18.72
14	12.4	17.8	11.80	23.44
15	6.9	5.5	15.88	15.79
16	1.8	12.9	-4.24	13.66
17	7.6	8.3	24.11	18.00
18	5.3	3.2	8.86	12.29

2.6.3 要因効果の解析

Table 2-6-3 の結果を要因効果図で表したグラフを Fig. 2-6-3 に示す。上図および下図の縦軸はそれぞれ SN 比と感度の値を表し、横軸は因子水準を表す。この線図の意味は、上下に大きく SN 比が広がっている制御因子がドラム歯幅変形量の削減に効果があると判断される。静スカラー特性評価において、SN 比の値が直線的に大きい方が望ましく、SN 比と感度の要因効果図を見比べた総合的評価に基づき最適条件を決定した。

Fig. 2-6-3 において最適と判断される水準は、それぞれ丸で囲まれた部分の因子；
 A2 「Beam mode : 4」、B1 「Spring load : small」、C1 「①Rotation speed : 8(rpm)」、D1 「①Beam current: 35 (mA)」、E1 「②Rotation speed: 8.5 (rpm)」、F1 「②Beam current: 70 (mA)」、G2 「Angle: 40 (degree)」、H3 「Convergent current: 695 (mA)」となる。

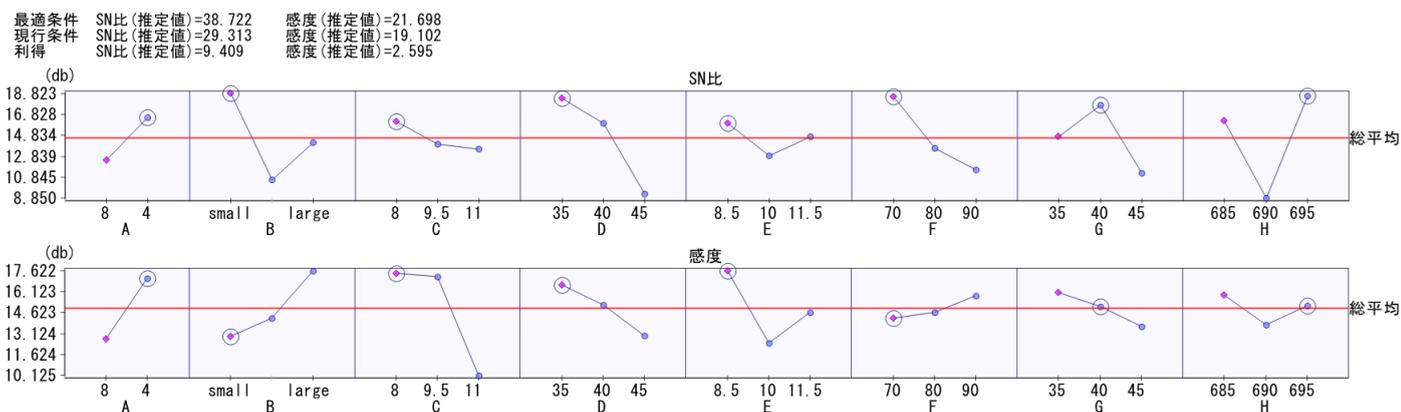


Fig. 2-6-3 Response graph

2.6.4 直交表実験による信頼性の確認

前項の要因効果図から選定した最適条件と現行条件における SN 比の推定値の算出結果を Table 2-6-4 に示す。最適条件の推定値が現行条件よりも高い結果となった。この結果を基に、L18 直交表実験結果に信頼性があるかどうかを確認した。

パラメータ設計では、直交表実験で得られた SN 比の最大値と最小値を求め、その差の 10% 値と推定した SN 比との差が 10% の範囲内であれば、信頼性があると判定できる。Table 2-6-5 に信頼性の評価結果 (10% of difference $0.947 \geq -0.757$) を示す。本実験における評価方法は、ある目標値に対する特性値の評価 (望目特性) を採用し、直交表実験には信頼性があると判断できた。このことは、パラメータ設計により決定した最適条件は、数ある組合せの中から適切な水準を選択したといえる。

Table 2-6-4 Estimated SN ratio

		A	B	C	D	E	F	G	H	Estimate
Current condition	Level	2	2	2	2	2	2	2	2	-
	SN Ratio	16.53	10.59	13.98	15.99	12.89	13.57	17.68	8.85	8.46
	Sensitivity	17.08	14.22	17.18	15.20	12.48	14.66	15.07	13.74	15.24
Optimum condition	Level	2	1	1	1	1	1	2	3	-
	SN Ratio	16.53	18.82	16.08	18.29	15.95	18.45	17.68	18.53	38.72
	Sensitivity	17.08	12.95	17.43	16.57	17.62	14.25	15.07	15.12	21.70

Table 2-6-5 Reliability

L18 experiment SN ratio		Reliability confirmation by estimation	
Maximum	18.82	Average of current condition	13.76
Minimum	8.85	Reverse estimated value	14.52
10% of difference	0.997	>	-0.757
Judgment		Reliable	

2.6.5 確認実験による再現性の確認

Table 2-6-6 に確認実験データを、Table 2-6-7 に再現性の評価結果を示す。

パラメータ設計における確認実験での再現性有無の条件は、最適条件の推定値と利得との差が $\pm 30\%$ 以内とされている。再現性を利得で判断する理由は、仮に環境が異なっても制御因子の改善効果は一貫性を持って再現できるという考え方からである。したがって、最適条件の推定値と利得の差が $\pm 30\%$ の範囲内であれば交互作用の影響を受けにくいシステムであり、実験効果の再現性が得られると判断できる。

さらに、統計学上の経験則から、推定値に対して実験値が $\pm 3\text{db}$ の範囲内であれば、再現性があると判断できる。したがって、Table 2-6-7の結果($|89-68|=\pm 21\% \leq \pm 30\%$, $|25.57-22.76|=\pm 2.81\text{db} \leq \pm 3\text{db}$)から、本実験は総合的に再現性を有すると判断できた。

Table 2-6-6 Confirmation experiment data

	N1 GNP cond.1	N2 GNP cond.2	SN ratio (db)	Sensitivity (db)
Current	25.7	7.5	0.66	22.85
Optimum	5.5	5	23.42	14.39

Table 2-6-7 Reproducibility of gain

	SN ratio		
	Estimated	Conf. value	Reproducibility
Current	8.46	0.66	8%
Optimum	34.40	23.42	68%
Gain	25.57	22.76	89%
Difference of gain (db)		2.81	Judge : OK

2.7 研究成果

本事例の実験及び評価解析結果から、溶接接合時に付加される溶込み熱エネルギーの影響による接合部の溶接深さを特性値とした理想機能を設定し、機能性評価法（静スカラー特性）を適用することで溶接強度と寸法精度の最適化についての有効性が検証できた。本研究の成果指標である「工程能力」の評価結果について、以下に述べる。

「工程能力」とは、製品を作る上で、品質に関する製品の規格内に収まる確率を表した能力をいう。工程変動による品質特性のバラツキの大きさが、その規格の幅に対しての安定度を示す尺度として、「工程能力指数(C_p)」が用いられる。その能力指数により、製品ロスの把握や検査頻度を決定する[2.9]。

すなわち、 $C_p = (\text{上限規格値} - \text{下限規格値}) / 6\sigma$ ($\sigma = \text{標準偏差}$)。 $C_p \geq 1.33$ ならば工程能力は十分である。 $1 \leq C_p < 1.33$ ならばほぼ良好である。 $C_p < 1$ ならば工程能力が不足していると判断される。本研究における現行条件と最適条件の C_p の評価結果を Table 2-7-1 に示す。計測データ（特性値）は歯幅(規格値； $5.80 \pm 0.1\text{mm}$)として、評価したサンプル数はそれぞれ 20 個で、 C_p は次式で算出した。

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (2.10)$$

USL : 上限規格値

LSL : 下限規格値

σ : 標準偏差

STW : 規格幅

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.11)$$

n : データの総数

x_i : 個々のデータ

\bar{x} : 平均値(AVG.)

Table 2-7-1 Process capability index

Current	
Sample	Data
1	5.82
2	5.80
3	5.81
4	5.77
5	5.78
6	5.80
7	5.76
8	5.82
9	5.83
10	5.76
11	5.81
12	5.80
13	5.81
14	5.79
15	5.83
16	5.75
17	5.74
18	5.84
19	5.79
20	5.85
AVG.	5.80
σ	0.03
Cp	1.09
Cpk	1.07
STW.	0.20
USL.	5.90
LSL.	5.70

Optimum	
Sample	Data
1	5.79
2	5.78
3	5.80
4	5.79
5	5.78
6	5.76
7	5.74
8	5.75
9	5.79
10	5.78
11	5.79
12	5.75
13	5.76
14	5.80
15	5.81
16	5.77
17	5.77
18	5.79
19	5.78
20	5.77
AVG.	5.78
σ	0.02
Cp	1.79
Cpk	1.39
STW.	0.20
USL.	5.90
LSL.	5.70

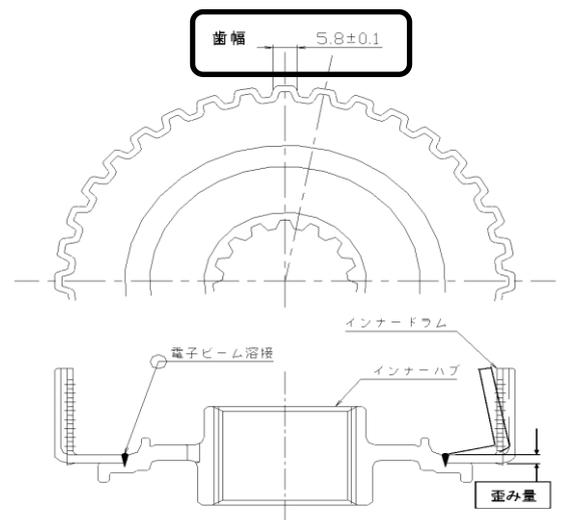


Table 2-7-1 で算出した C_p のデータ分布（散らばり）を度数分布表にまとめて、グラフ化したヒストグラムを Fig.2-7-1, 2-7-2 に示す。グラフの結果から、現行条件に比べて最適条件における計測データである歯幅の変動幅が削減され、 $C_p \geq 1.33$ の条件を満足している結果から正規分布形（正常形）に近づいたといえる。それにより工程能力の向上による高生産性と低コスト化について検証できた。

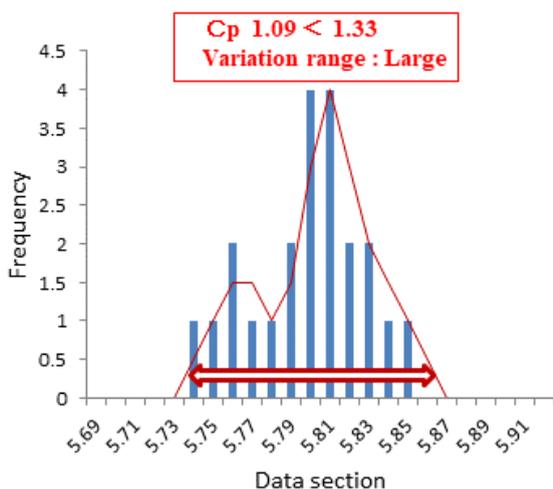


Fig. 2-7-1 Histogram of Current

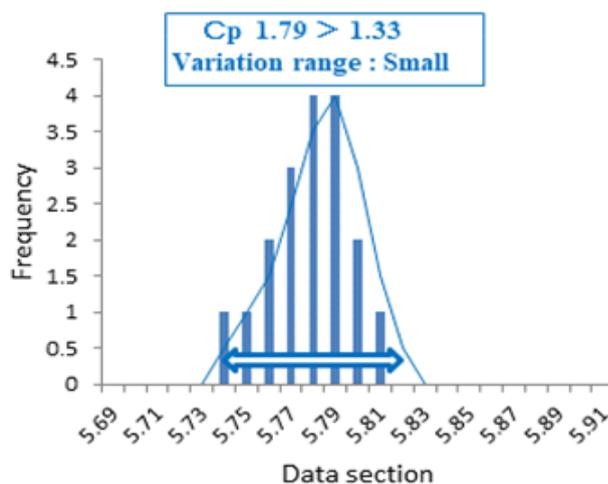


Fig. 2-7-2 Histogram of Optimum

最適化による具体的な成果は以下の通りである。

- (1) 特性値である溶接深さのばらつき削減により、品質を従来以上に向上させるとともに、現行の加工条件に比較してひずみによるドラム歯幅変形量が削減された。
(削減幅 $5.1\mu\text{m}$, 率 54%減)
「高品質 (Q) ドラム変形量 54%削減」
- (2) ドラム歯幅変形量の変動幅が削減されたことにより、工程能力が向上し
($C_p=1.79 > 1.33$) , 検査工程の削減につながった。
「高生産性 (D) 可動率 20%向上」
- (3) 工程能力の向上により、加工後の製品の全数検査の廃止により、製造原価の削減となった。
「低コスト化 (C) 製造原価 20%削減」

最終的な検証成果として、溶接強度と寸法精度の最適化により溶接接合部のひずみ量が大幅に削減され、生産性指標の3要素である「高品質 (Q)」、「低コスト化 (C)」、「高生産性 (D)」（QCD）を同時に達成することができた。

2.8 今後の研究課題

電子ビーム溶接においても、他の溶接方式と同様にさまざまな欠陥が発生する。電子ビーム溶接では、材料とビームが短時間に激しく相互作用を起こすと、溶融池がキーホール型と呼ばれる特徴的な形状に起因した特有のポロシティーと割れが発生する [2.19]-[2.21]。

(1) ポロシティー

高エネルギー密度のビーム溶接は一般に溶け込み深さと幅のアスペクト比が大きいことから、溶融池が不安定になりやすく、雰囲気中あるいは溶融金属から発生するガストラップにより、比較的大型の不定形なポロシティーが発生する。

(2) 割れ

キーホール型の溶け込み形状という形状的な要因と、凝固速度が速いという冶金的な要因により、凝固粒界や柱状の結晶の会合部で高温割れが発生しやすい。特にアルミニウム合金やニッケル基合金の溶接においては、液化割れが発生することがある [2.31]。

このような溶接欠陥による品質課題に関して、溶融池の安定化と最適化に向けた研究に取り組む。具体的には、キーホール型の溶け込みなどの形状的な因子と、凝固速度という冶金的な因子、割れ感受性の低い材料等をパラメータとした溶込み熱エネルギーの影響による理想機能の新たな設定による溶接強度と寸法精度の最適化を図る計画である。

参考文献

- [2.1] 村上英信, 石見泰造, 安永政司: 溶接学会第 46 回電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-366-85, (1985).
- [2.2] 金子文平, 齋藤裕貴, 柴田文男, 高橋博正: 「電子ビーム溶接による状黒鉛鋳鉄と炭素鋼との溶接性」 第 62 期日本材料学会学術講演会講演論文集, pp.389-390, (2013).
- [2.3] 田口玄一: 最適化設計のための評価技術, 日本規格協会, pp.13-90, (2002).
- [2.4] 立林和夫: 入門タグチメソッド, 日科技連, pp.9-37, (2004).
- [2.5] 鈴木真人: 難しくない品質工学, 日刊工業新聞社, pp.34-48, (2016)
- [2.6] 越水重臣, 鈴木真人: 実践 品質工学, 日刊工業新聞社, pp.3-56, (2007).
- [2.7] 広瀬健一, 上田太一郎: タグチメソッド解析法入門, 同友館, pp.1-24, (2015).
- [2.8] 山森隆宏, 柴山尚士, 雨宮泉: オートマチックトランスミッション[構造・作動・制御], 山海堂, pp.14-55, (2005).
- [2.9] 矢野宏: 品質工学計算法入門, 日本規格協会, pp.74-137, (2002).
- [2.10] 田口玄一, 矢野宏: 品質工学応用講座「機械・材料・加工の技術開発」, 日本規格協会, pp.150-155, (2001).
- [2.11] 矢野宏: 品質工学入門, 日本規格協会, pp.109-122, (2011).
- [2.12] 山田哲司, 救仁郷誠: オンライン品質工学「検査設計」の複数工程への適用—複数検査工程における検査設計の提案—, 品質工学会誌, Vol.22, No.1, (2014).
- [2.13] 垣田健, 三宅鹿生, 山本慈喜: 人間作業工程へのパラメータ設計の適用, マツダ技報, No.27, pp.164-168, (2009).
- [2.14] 西里静彦: 質的データの数量化, 朝倉書店, (1982).
- [2.15] 入江宏定, 橋本達哉, 稲垣道夫: 電子ビーム溶接の溶込み深さに関する研究 (第 3 報), 溶接学会誌, 第 46 巻 第 9 号 pp.642-648, (1977).
- [2.16] 前田哲志, 吉川利幸: パルス電子ビームの加工特性と溶接品質の向上, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, D37-191-192, (2013).
- [2.17] 中島透, 芝一芳, 為ヶ谷和也, 塚本清一: 電子ビーム溶接機のビーム軌道アライメント調整及びフィラメント電流校正の自動化, 溶接学会論文集, 第 27 巻 第 3 号 pp.163-169, (2009).
- [2.18] 柴田文男: 高エネルギー密度溶接法による鉄鋳物などの溶接性, 鋳造工学会, 第 83 巻 第 12 号 pp.721-726, (2011).

- [2.19] 西本和俊：“新溶接・接合プロセスの最近の動向“，溶接学会全国大会講演概要，第71集 F3-12, (2002).
- [2.20] 田村，近藤：溶接施工管理－自動車，溶接学会誌，Vol.49 No.12 pp.7-14, (1980).
- [2.21] 中山繁：“最近の溶接技術の進歩”，溶接学会誌，第44巻 第10号 pp.781-790, (1975).
- [2.22] 鈴木勇，押野源治：フリクションディスク継時安定化の研究，品質工学会誌，Vol.6, No.5, pp. 38-42, (1998).
- [2.23] 鈴木勇，押野源治：スリップクラッチ出力トルクの安定化，第5回品質工学研究発表大会論文集，pp.115, (1997).
- [2.24] 日比野良一，宮部友博，大澤正敬，大坪秀顕：自動変速機の変則性魚適合ロバスト設計法，自動車技術会，Vol.44, No.3, pp.815-821, (2013).
- [2.25] 田口玄一：新製品開発におけるパラメータ設計，日本規格協会，pp.1-74, (1988).
- [2.26] 田口玄一：技術開発のための品質工学，日本規格協会，pp.1-24, (1999).
- [2.27] 品質工学シンポジウム：21世紀の品質工学と技術開発への適用，中部品質管理協会，pp.31-38, (2002).
- [2.28] 加藤芳章，柴山尚士：自動変速機の構造・機能と湿式クラッチ，トライポロジスト，Vol.39, No.12, pp.6-11, (1994).
- [2.29] 加藤芳章，赤坂量康，千葉啓貴，森泰志：自動変速機摩擦材の摩擦特性解析，トライポロジスト，Vol.39, No.12, pp.71-78, (1994).
- [2.30] 三浦達人，他：セグメント接着方式における自動車用湿式クラッチの摩擦特性について，HONDA Technical Review, Vol.10, pp.142-149, (2006).
- [2.31] 菅哲男，他：薄板の電子ビーム溶接継手における残留応力特性，神戸製鋼技報 /Vol.63 No.1 (Apr.2013).
- [2.32] Eiji Toma : Optimization of Clutch Drum Heat Treatment Processing Condition for Automobile AT using “Robust Design”, Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers, vol.6, no.3, pp.119–127, (2018).
- [2.33] Eiji Toma : Study on surface modification of paper friction material by optimization design of clutch disk construction equipment for automobile AT, Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers, vol.6, no.2, pp.80–85, (2018).

第 3 章 射出成形加工部品の樹脂充填性評価

3.1 検証事例(2)

テーマ：樹脂流動に関わる溶融エネルギーに着目した機能性評価による樹脂成形加工プロセスの最適化

3.2 研究課題と概要

近年、プラスチック製品の需要が高まり量産化や軽量化、高精密化が進み、設計開発や生産技術分野においては、成形不良や製品強度などの品質保証に関わる課題解決のために、学術的な深化とともに、樹脂の流動・挙動に関する解析技術のニーズが高まっている。特に樹脂の成形加工プロセスにおいては、製品形状・金型構造の自由度が高く、複雑な多次元情報の解析を適用した品質機能を創りこむことが重要課題となっている。

樹脂材料の強度と寸法安定性に関する品質問題を解決するには、解析評価手法であるパラメータ設計における“機能性評価法”の適用が有効である [3.1]-[3.2]。

本事例では、樹脂強度の最適化について、金型内の樹脂充填密度の管理機能（樹脂流動に関わる溶融エネルギーの入出力関係）に着目し、材料力学的な考察による“評価特性値である樹脂充填密度のばらつき安定化を理想機能とした機能性評価法（静スカラー特性）”を提案し、その有効性について検証した。検証成果として、樹脂射出成形品の強度の安定化には、管理機能である金型内の樹脂充填密度の均一化が重要であることを明らかにした[3.27]- [3.29]。

3.3 はじめに

近年、自動車業界では従来にも増し、環境対応への取組みが積極的に進められ、その活動として部品の軽量化による燃費向上が推進されている。その一例として自動車用スチール製プーリの樹脂化も盛んに行われている。欧州の自動車メーカーでは、パワーステアリング用プーリやアイドラプーリ等の樹脂化が推進されている。特にプーリの樹脂化率は約 30%にも達している (Fig. 3-3-1)。しかしながら、日本国内の自動車メーカーでは、プーリの樹脂化率は 5~6%と低く、これからの伸びが期待される。

現在実用化されている樹脂プーリは、強度や寸法安定性の点で決してスチール製プーリの代替品として十分な特性を有しているとはいえない [3.22]-[3.25]。

エンジニアリング・プロセスにおいて、理論値ぎりぎり品質の安定化を迫及した製品は、条件のばらつきの影響を受け易い。その結果、「不良率の上昇と工程能力の低下」というトレードオフへと発展する [3.4]-[3.5]。

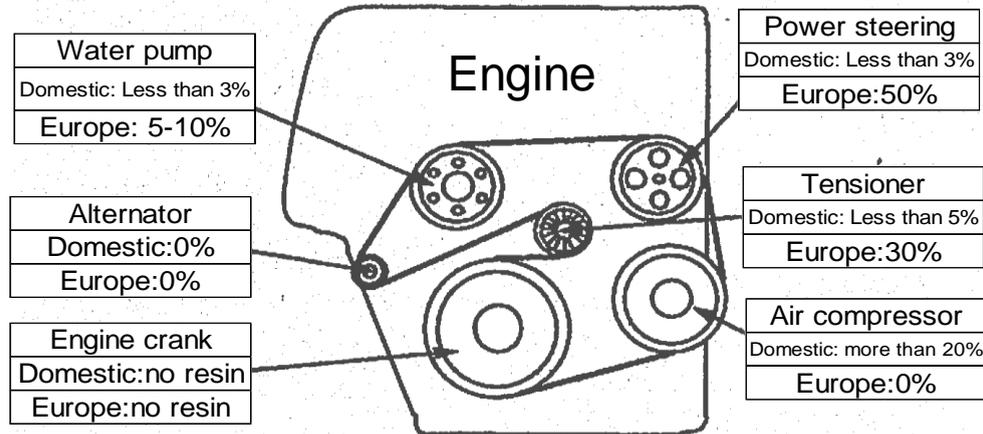


Fig. 3-3-1 Resin status of automobile pulleys

3.4 樹脂射出成形加工プロセスの概要

樹脂の成形加工方法には、目的に応じていくつかの種類があるが、本研究では、量産に適した射出成形加工条件の最適化に取り組んだ。射出成形加工法とは、加熱溶融した材料を金型内に注入し、冷却・固化させる事によって、成形品を得る方法である。それは、複雑な形状の製品を大量に生産するのに適し、成形加工の一大分野をなしている。一般に射出装置は、Fig. 3-4-1 に示すような射出成形機(モデル)を採用している。

Fig. 3-4-2 に示すように、射出成形工程は、大きく6つに分けられ、①型締め、②射出、③圧力保持、④冷却、⑤金型開き、⑥製品の取出しの順序で加工される。このプロセスを経て、連続生産が可能となる [3.3]-[3.9]。射出成形機は型締ユニットと射出ユニットに分かれる。型締ユニットは、金型の開閉機能を有し、図のようなトグル式を採用している。射出ユニットは樹脂を加熱溶融させ、金型内へ射出する。スクリューを回転させ、ホッパーから投入した樹脂をスクリュー前部へ溜め後、射出する。樹脂が流動している時は、スクリューの射出速度を制御し、樹脂が充填された後は圧力で制御する。速度制御から圧力制御への切換えは、一定のスクリュー位置や射出圧力に達した時に切換わるように設定される [3.10]-[3.12]。

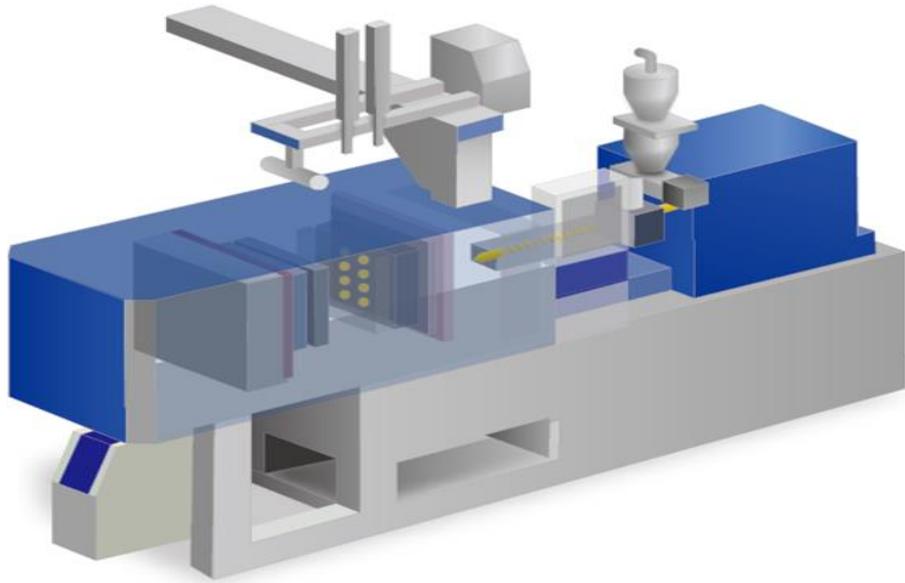


Fig. 3-4-1 Machine model

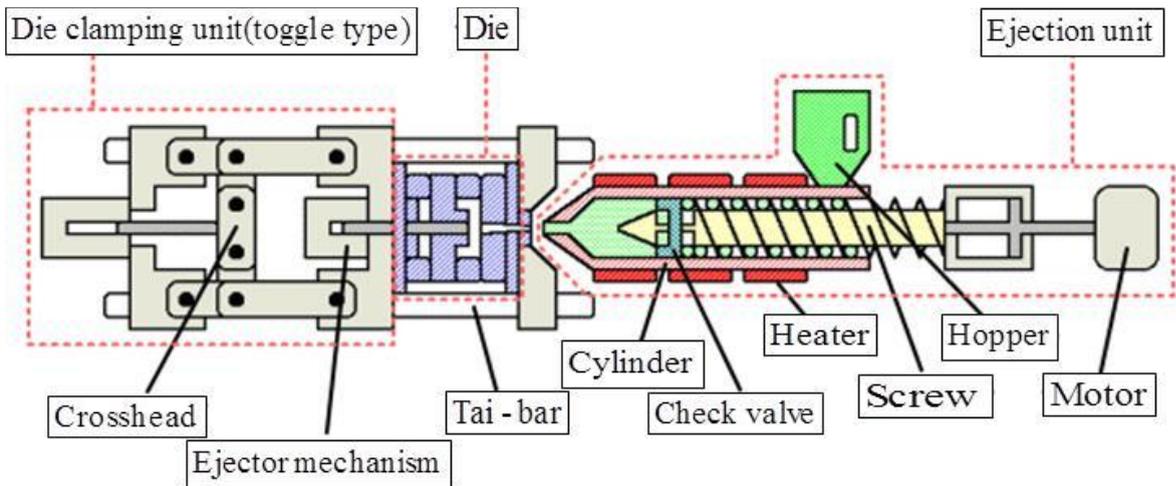


Fig. 3-4-2 Injection molding machine

3.5 材料力学的考察による新たな理想機能の設定

成形された樹脂プーリ部品の断面図を Fig. 3-5-1 に示す。品質課題は、機械的強度不足と応力集中により、赤丸で示した R 部に亀裂が発生することである。本事例では、樹脂強度の適正化に関して、材料力学的な考察による理想機能の設定に着目し、樹脂材料の許容応力と材料密度の関係式を以下のように新たに定義した [3.24]。

$$\text{Allowable stress : } \sigma = M/Z = K \cdot \rho \quad (3.1)$$

M : Moment of force, Z : Section modulus

K : Proportional factor, ρ : Resin filling density

{式(3.1)の物理量を寸法形状 $[L]$ と加工時間 $[T]$ 一定とみなし次元単位に置換えると、力のモーメント $M = [ML^2T^{-2}]$, 断面係数 $Z = [L^3]$ であるから、

$$\rightarrow \sigma = \frac{[ML^2T^{-2}]}{[L^3]} = [L^2T^{-2}][ML^{-3}] = K \cdot \rho \text{ と定義できる。}$$

樹脂強度の指標である許容応力は、断面係数と力のモーメントで決定される。したがって、材料の寸法形状と加工時間が一定の条件であれば、式(3.1)に示すように、許容応力 σ と材料の密度 ρ がある比例定数 K を持った線形的（一次式）な比例関係になると定義できる。この定義に基づき、樹脂充填密度 ρ のばらつき度合を安定化させることが樹脂強度の最適化には有効性が高いと推定した。

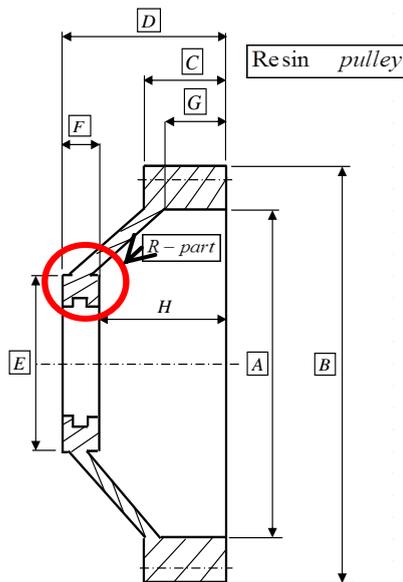


Fig. 3-5-1 Pulley sectional view

樹脂強度の最適化には、金型内の樹脂充填密度の管理機能（樹脂流動に関わる溶融エネルギーの入出力関係）の重要性に着目し、材料力学的な考察から Fig. 3-5-2 に示す理想機能を設定した。入力を樹脂流動時の溶融エネルギーに関わる成形加工条件のパラメータ（制御因子）とし、出力である樹脂充填密度を評価特性値とした理想機能を新たに設定し、樹脂強度の最適化に対する機能性評価（静スカラー特性）の適用の提案に関して、その有効性を検証した [3.8]。

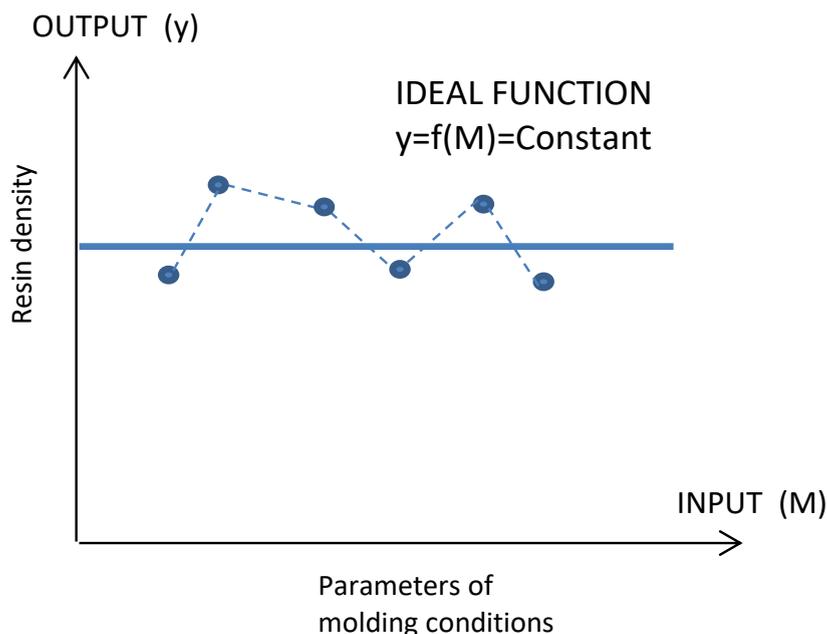


Fig. 3-5-2 Relations of ideal function

3.6 樹脂の充填性評価

3.6.1 水準表の作成

各種因子と水準表を Table 3-6-1, 3-6-2 に示す。「制御因子(Control factors)」は、射出成形加工条件 {樹脂流入口のゲート幅 (Gate width: A) , 実測温度制御による金型温度 (Mold temperature: B) , 射出シリンダーの温度設定による樹脂温度 (Resin temperature: C) , 射出に必要な体積の樹脂計量位置 (Measurement level: D) , スクリューが後退する際の背圧力 (Screw back pressure: E) , 樹脂の逆流防止用保圧力 (Retention pressure: F) , 成形時のスクリュー回転数 (Screw rotational speed: G) , 軸受けブッシュの予熱温度 (Bush temperature: H) } を各水準に割付けして、「誤差因子 (Noise factors)」は、同一製品の加工に使用される金型 2 種類 (No.3 Die と No.2 Die) とした。

Table 3-6-1 Control factors level

Factor name	Symbol	Level		
		1	2	3
Gate width (mm)	A	0.5	0.8	-
Mold temperature (°C)	B	165/167	175/177	185/187
Resin temperature (°C)	C	96	102	108
Measurement level (mm)	D	103	105	107
Screw back pressure (MPa)	E	4	8	12
Retention pressure (MPa)	F	35/30	45/40	55/50
Screw rotational speed(rpm)	G	490	510	530
Bush temperature (°C)	H	165	185	205

Table 3-6-2 Noise factors level

Symbol	Factor name	Level	
		1	2
N	Die kinds	No.3 Die	No.2 Die

3.6.2 「直交表」の割付と実験結果

水準表に基づいて、実験計画を立てるための統計ツールである「直交表」を作成した。

Table 3-6-3 に直交表の割付と実験結果を示す。内側に「制御因子(A~H)」を、外側に「誤差因子(N1, N2)」を割付けた L18 直交表実験データ（充填密度 単位；kg/m³）を示している。パラメータ設計において、内側の割付けには混合型直交表(L12, L18 など)を用いることが多く、主効果のみを割付ける。実験の回数は、直交表左側の実験番号で表わされる。本実験回数は 18 回で、横方向の上段は制御因子の種類を表わす。その下に羅列された値が制御因子の水準を表わしている。

直交表を使用するメリットは、実験回数の削減であり、直交表を使用しない場合の実験回数は、総当たりの確立から、 $2^1 \times 3^7 = 4,374$ 通りになる [3.26]。

Table 3-6-3 L18 Orthogonal array

EXP. No	A	B	C	D	E	F	G	H	Density[kg/m ³]	
									N1	N2
1	0.5	165/167	96	103	4	35/30	490	165	0.78	0.8
2	0.5	165/167	102	105	8	45/40	510	185	0.79	0.8
3	0.5	165/167	108	107	12	55/50	530	205	0.75	0.79
4	0.5	175/177	96		8	45/40	530	205	0.76	0.79
5	0.5	175/177	102	105	12	55/50	490	165	0.79	0.81
6	0.5	175/177	108	107	4	35/30	510	185	0.78	0.8
7	0.5	185/187	96	105	4	55/50	510	205	0.77	0.8
8	0.5	185/187	102	107	8	35/30	530	165	0.76	0.79
9	0.5	185/187	108	103	12	45/40	490	185	0.79	0.8
10	0.8	165/167	96	107	12	45/40	510	165	0.81	0.8
11	0.8	165/167	102	103	4	55/50	530	185	0.79	0.8
12	0.8	165/167	108	105	8	35/30	490	205	0.76	0.78
13	0.8	175/177	96	105	12	35/30	530	185	0.8	0.79
14	0.8	175/177	102	107	4	45/40	490	205	0.78	0.79
15	0.8	175/177	108	103	8	55/50	510	165	0.77	0.79
16	0.8	185/187	96	107	8	55/50	490	185	0.77	0.79
17	0.8	185/187	102	103	12	35/30	510	205	0.79	0.81
18	0.8	185/187	108	105	4	45/40	530	165	0.79	0.8

3.6.3 SN比と感度の算出

機能性評価において、「SN比」と「感度」を求めて、最終的に「要因効果図」で効果の有無により最適条件が得られる。「SN比」の算出方法には、いくつかの種類があり、設定した理想機能に合う方法を採用した。

本研究では、材料力学的な考察による新たな定義に基づき、樹脂強度の最適化には、金型内の樹脂充填密度の管理機能（樹脂流動に関わる熔融エネルギーの入出力関係）の重要性に着目した理想機能の設定により、特性値である樹脂充填密度がある一定の目標値になることが理想であるため、「望目特性」でSN比を算出した [3.7]。

次式に示すように、SN比 η は平均の2乗と分散の比で計算されて、分母はノイズによるばらつきを表し、分子は出力平均の効果を表している [3.21]-[3.22]。

$$\eta = 10 \log \frac{\hat{m}^2}{\hat{\sigma}^2} = 10 \log \frac{1}{V_e} \frac{(S_m - V_e)}{n} \text{ [db]} \quad (3.2)$$

有効成分（平均値の変動）； $S_m = \frac{1}{n} (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n)^2$

有害成分（平均値の変動）； $V_e = \frac{1}{n-1} (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2 - S_m)$

特性値の数； n

感度 S は、入出力の変換効率（理想機能直線の出力変動への影響度）の評価指標を表し、次式に示すように、平均値の2乗を10倍して対数変換により算出される。単位はSN比と同様に[db]で表記される。

$$S = 10 \log \hat{m}^2 = 10 \log \frac{1}{n} (S_m - V_e) \text{ [db]} \quad (3.3)$$

本事例の直交表に対応した実験毎のSN比と感度の計算した結果を Table 3-6-4 に示す。

Table 3-6-4 SN ratio and Sensitivity

EXP.No	A	B	C	D	E	F	G	H	SN ratio	Sensitivity
1	0.5	165/167	96	103	4	35/30	490	165	34.942	-2.048
2	0.5	165/167	102	105	8	45/40	510	185	41.017	-1.993
3	0.5	165/167	108	107	12	55/50	530	205	28.696	-2.273
4	0.5	175/177	96	103	8	45/40	530	205	31.252	-2.216
5	0.5	175/177	102	105	12	55/50	490	165	35.051	-1.939
6	0.5	175/177	108	107	4	35/30	510	185	34.942	-2.048
7	0.5	185/187	96	105	4	55/50	510	205	31.364	-2.104
8	0.5	185/187	102	107	8	35/30	530	165	31.252	-2.216
9	0.5	185/187	108	103	12	45/40	490	185	41.017	-1.993
10	0.8	165/167	96	107	12	45/40	510	165	41.126	-1.884
11	0.8	165/167	102	103	4	55/50	530	185	41.017	-1.993
12	0.8	165/167	108	105	8	35/30	490	205	34.719	-2.271
13	0.8	175/177	96	105	12	35/30	530	185	41.017	-1.993
14	0.8	175/177	102	107	4	45/40	490	205	40.908	-2.103
15	0.8	175/177	108	103	8	55/50	510	165	34.831	-2.159
16	0.8	185/187	96	107	8	55/50	490	185	34.831	-2.159
17	0.8	185/187	102	103	12	35/30	510	205	35.051	-1.939
18	0.8	185/187	108	105	4	45/40	530	165	41.017	-1.993

3.6.4 「要因効果図」による解析

SN比，感度の要因効果図を Fig. 3-6-1 に示す。上図および下図の縦軸はそれぞれ SN比と感度の値を表し，横軸は因子水準を表す。この線図の意味は，上下に大きく SN比が広がっている制御因子が樹脂強度の安定化に有意性が高いと判断される。静スカラー特性評価において，SN比の値が直線的に大きい方が望ましく，SN比と感度の要因効果図を見比べた総合的の評価に基づき最適条件を決定した。

Fig. 3-6-1 において最適と判断される水準は，それぞれ丸で囲まれた部分の因子； A2 「Gate width (mm): 0.8」， B1 「Mold temperature (°C): 165/167」， C2 「Resin temperature (°C): 102」， D2 「Measurement level (mm): 105」， E1 「Screw back pressure (MPa): 4」， F2 「Retention pressure (MPa): 45/40」， G1 「Screw rotational speed(rpm): 490」， H2 「Bush temperature (°C): 185」 となる。

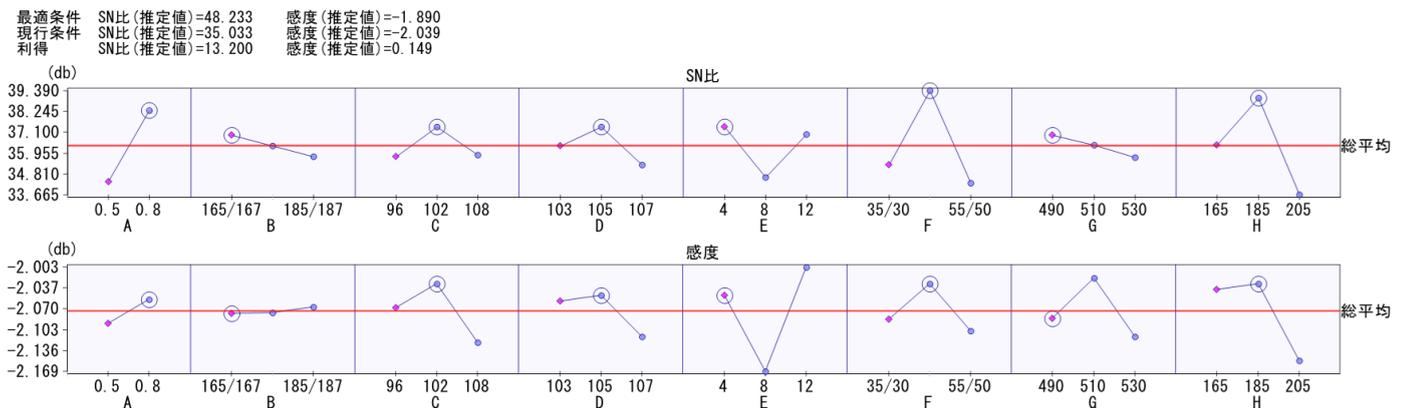


Fig. 3-6-1 Response graph

3.6.5 直交表実験による信頼性の確認

前項の要因効果図から選定した最適条件と現行条件における SN 比の推定値の算出結果を Table 3-6-5 に示す。最適条件の推定値が現行条件よりも高い結果となった。この結果を基に、L18 直交表実験結果に信頼性があるかどうかを確認した。

パラメータ設計では、直交表実験で得られた SN 比の最大値と最小値を求め、その差の 10% 値と推定した SN 比との差が 10% の範囲内であれば、信頼性があると判定できる。Table 3-6-6 に信頼性の評価結果 (10% of difference $1.243 \geq -34.242$) を示す。本実験における評価方法は、ある目標値に対する特性値の評価 (望目特性) を採用し、直交表実験には信頼性があると判断できた。このことは、パラメータ設計により決定した最適条件は、数ある組合せの中から適切な水準を選択したといえる [3.26]。

Table 3-6-5 Estimated SN ratio and Sensitivity

Condition	A	B	C	D	E	F	G	H	Estimated			Gain	
									SN ratio	Sensitivity	Average	SN ratio	Sensitivity
Optimum	0.8	165/167	102	105	4	45/40	490	185	48.233	-1.89	0.804	13.2	0.149
Current	0.5	165/167	96	103	4	35/30	490	165	35.033	-2.039	0.791		

Table 3-6-6 Reliability

L18 experiment SN ratio		Reliability confirmation by reverse estimation	
Maximum	41.126	Average of current conditio	0.791
Minimum	28.696	Reverse estimated value	35.033
10% of difference	1.243	>	-34.242
Judgment		Reliable	

3.7 研究成果

本事例では、樹脂強度の最適化について、金型内の樹脂充填密度の管理機能（樹脂流動に関わる溶融エネルギーの入出力関係）に着目し、材料力学的な考察による“評価特性値である樹脂充填密度のばらつき安定化を理想機能とした機能性評価法（静スカラー特性）”を提案し、その有効性について検証した。検証成果として、現行の生産性指標である「高品質（Q）」において、成形不良（肉薄部の亀裂・ひび割れ）の品質保証に関わる工程内不良率50%低減となり、樹脂射出成形品の強度の安定化には、管理機能である金型内の樹脂充填密度の均一化が重要であることを明らかにした [3.13]-[3.14]。

さらには、樹脂流動に関わる溶融エネルギーの入出力関係に着目した理想機能の設定による機能性評価法（静スカラー特性評価）の適用が、設計論的見地から樹脂成形品開発における品質機能モデルの構築化に大きな知見をもたらすものであることが検証できた。

3.8 今後の研究課題

今後の研究課題として、樹脂の収縮率の変動による形状変化のばらつきは、金型寸法と成形品寸法の応答性で決まり、常に線形的な比例関係にあるという技術的根拠に着目し、樹脂流動に関わる溶融エネルギーと金型内の樹脂収縮率のばらつきの関係についての新たな理想機能を設定し、動特性評価による部品の強度と寸法精度のさらなる最適化を図る予定である [3.15]- [3.20]。

参考文献

- [3.1] 留目剛：品質工学と CAE 活用によるフレーム形状の最適化設計，品質工学会誌，Vol.12, No.4, pp.73-81, (2004).
- [3.2] 白川智久，神原憲裕，杉山昭，斎藤之男，矢野宏：転写性による射出成形条件の評価ーシミュレーションによる転写性の検討ー，品質工学会誌，Vol.12, No.4, pp.66-72, (2004).
- [3.3] 杉山昭：射出成形における保形性の再検討，第 10 回品質工学研究発表大会論文集，pp.18-21, (2002).
- [3.4] 田口玄一：実験計画法と品質工学，品質工学会誌，Vol.2, No.1, pp.2-8, (1993).
- [3.5] 田口玄一：品質工学講座(1)「開発設計段階の品質工学」，日本規格協会，(1988).
- [3.6] 増田雪也：プレス打抜き加工における加工条件の最適化，品質工学会誌，Vol.12, No.1, pp.97-104, (2004).
- [3.7] 畠山鎮，石丸節男，安田美穂：半導体製造工程における品質工学の活用(1)ー全社的展開の方法ー，品質工学会誌，Vol.12, No.6, pp.66-72, (2004).
- [3.8] 機械加工ラインにおけるオンライン品質工学の展開とサイクルタイム短縮，品質工学会誌，Vol.10, No.6, pp.97-104, (2002).
- [3.9] 常田聡，清水久登：射出成形の生産工程設計方法の研究ー可塑化装置のパラメータ設計から MT システムによる解析までー，品質工学会誌，Vol.19, No.1, pp.44-51, (2011).
- [3.10] 常田聡：射出成形機における材料落下口形状の最適化，品質工学会誌，Vol.15, No.5, pp.174-180, (2007).
- [3.11] 常田聡：バーフロー金型における射出成形機条件の最適化，品質工学会誌，Vol.16, No.4, pp.53-57, (2008).
- [3.12] 高橋和仁：射出成形機における可塑化装置の最適化，品質工学会誌，Vol.13, No.2, pp.53-59, (2005).
- [3.13] 杉山昭，堀信夫，徐世中，本間精一，泉田敏明，矢野宏：射出成形品の転写性と曲げ試験による射出成形機と成形条件の最適化，品質工学会誌，Vol.9, No.1, pp.22-30, (2001).
- [3.14] 田口玄一，馬場幾郎：品質工学応用講座「転写性の技術開発」，日本規格協会，(2000).

- [3.15] 大村平：実験計画と分散分析のはなし，日科技連，(2015).
- [3.16] 矢野宏：加工品質工学，工業調査会，(1994).
- [3.17] 山村英記 他：「薄肉 S 字型射出成形品の最適化研究」，品質工学会誌，Vol.15, No.4, (2007).
- [3.18] 三浦克朗：シミュレーションによる射出成形機の型締機構の最適化，品質工学会誌，Vol.16, No.1, pp.78-83, (2008).
- [3.19] 櫻井基樹 他：「MT システムによる射出成形品の均一充填性評価」（平成 19 年度），日本大学生産工学部学術講演会講演概要，pp.9-12, (2007).
- [3.20] 森田晴美，松田次郎，小池昌義：セラミックス射出成形技術の高度化研究－品質工学によるリブ付き成形品の射出条件最適化－，鹿児島県工業技術センター研究報告 No.7, pp.29-35, (1993).
- [3.21] 鶴田明三：エネルギー比型 SN 比，日科技連，(2016).
- [3.22] 田口玄一，矢野宏：品質工学応用講座「機械・材料・加工の技術開発」，日本規格協会，(2001).
- [3.23] 田口玄一：品質工学応講座(5) 品質工学事例集 日本編一般，日本規格協会，(1992).
- [3.24] 日本塑性加工学会編：流動解析－プラスチック成形，コロナ社，(2004).
- [3.25] 岩野昌夫：プラスチックの自動車部品への展開，日本工業出版，(2011).
- [3.26] 越水重臣，鈴木真人：バーチャル実験で体得する実践・品質工学，日刊工業新聞社，(2007).
- [3.27] Eiji Toma: Optimization of the Resin Injection Molding Process using Parameter Design, Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers, vol.5, no.3, pp.150-155, (2017).
- [3.28] Eiji Toma: Analytical research on resin injection molding process applying "Quality Engineering", The 4th International Conference on Manufacturing Process Technology 2017 (ICMPT-4 2017), August 24-27, 2017, (Muroran).
- [3.29] 當摩栄路：「樹脂成形加工プロセスの最適化による自動車部品の軽量化研究（パラメータ設計による樹脂成形プロセスの最適化）」，日本設計工学会 平成 27 年度秋季研究発表講演会論文集，D15 pp157～160 .

第 4 章 汎用モータ部品生産プロセスの最適化

4.1 検証事例(3)

テーマ： 誘導加熱エネルギーの入出力の直線性に着目した
機能性評価によるモータ部品生産プロセスの最適化

4.2 研究課題と概要

汎用モータ部品の生産プロセスにおける従来工法として、モータの主要部品であるロータコアとシャフトの嵌合過程で圧入方式が採用されていたが、圧入時にコアシャフトの芯振れという品質不具合が発生した。

本事例では、「パラメータ設計」を適用した汎用モータ用ロータ・シャフトの高周波誘導加熱による新たな焼嵌め工法を考案し、高周波誘導加熱エネルギーの入出力の直線性に着目し、“ロータ・シャフト挿入時のシャフト径と芯振れの入出力関係（線形的比例関係）を理想機能とした機能性評価法（動ベクトル特性）”の適用を提案し、入力信号を変えて出力の直線性を解析し、これをエネルギー比型 SN 比で評価することで、よりロバストネス（頑健性のある）な工法の最適化に関する有効性について検証した [4.20]。研究成果として、直交表実験の結果から SN 比を求め、要因効果図から最適な加工条件水準の組み合わせの抽出と確認実験により、焼嵌め工法が実践的に適用可能であり、従来工法よりも優位性があり、品質確保が技術的に保障できるということを明らかにした。また、「新しい工法の信頼性向上（高品質）」と高周波誘導加熱技術の採用による「量産工法の開発（高生産性）」、さらには、省人化とエネルギー損失低減化による「製造原価の削減化（低コスト化）」を同時に達成することができた。

4.3 従来工法の課題と新たな工法の考案

本研究で使用したモータの主要構成部品であるロータコアとシャフトを Fig. 4-3-1 に示す。ロータコアとシャフトの嵌合工程では、従来から圧入工法が採用されているが、Fig. 4-3-2 に示すように、圧入時に生じるロータ・シャフトの「芯振れ」という品質不具合が発生している。その要因は、シャフト圧入時の偏荷重によることが経験的にわかっている。

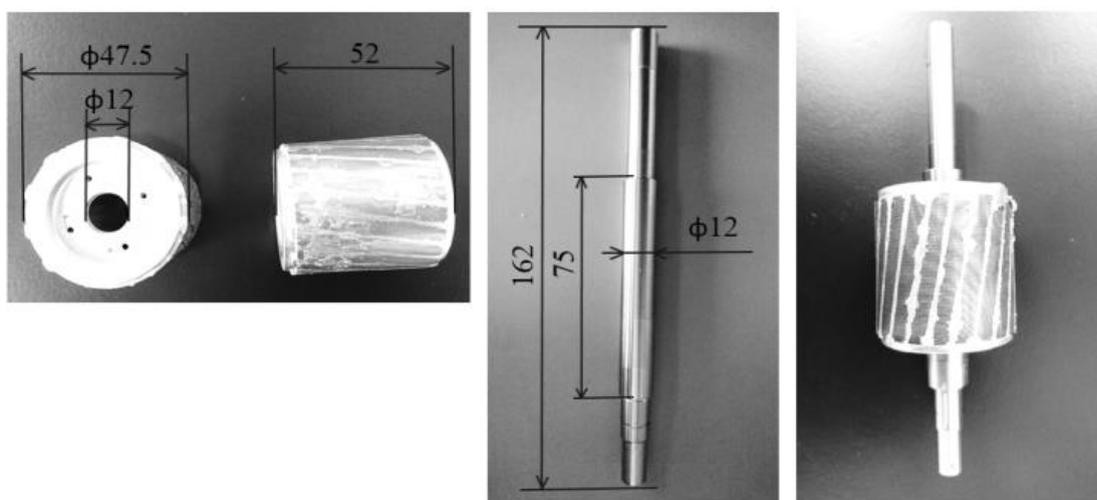


Fig. 4-3-1 Rotor core and Shaft

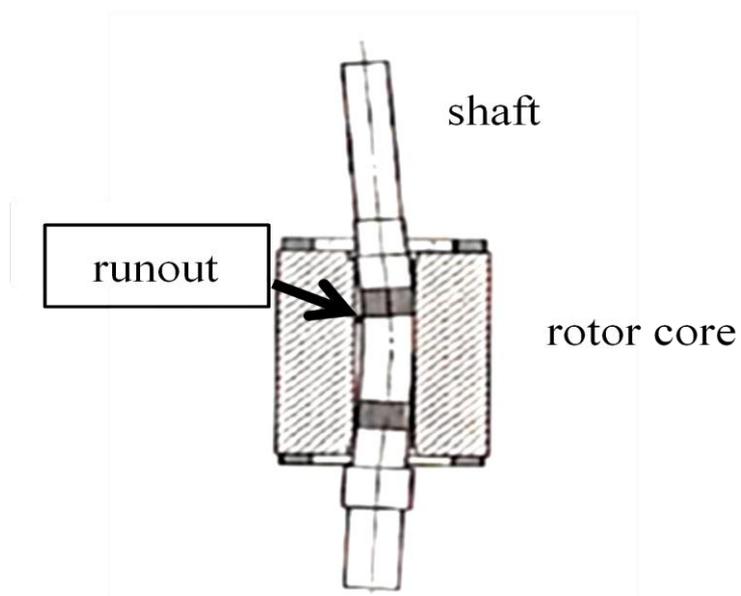


Fig. 4-3-2 Inferior quality model

また、対象とするロータ・シャフト径が、規格によって変化すれば、圧入工法の加工条件も変更する必要がある、実際には、工程能力不足で良品率 100%は達成できず、工程内の全数検査の廃止には至っていないのが現状である[4.32]。

そこで本研究では、新たな工法として「高周波誘導加熱による焼嵌め工法」を考案し、その工法の実現性の可否を効率的に評価する有効な手段であるパラメータ設計における動特性評価の適用により工法の最適化に取り組んだ。焼嵌め工法は、ローターを再結晶温度程度まで加熱しシャフト挿入穴の径を膨張させることで、シャフトを円滑に嵌め合やす方法である。この工法は、圧入工法に比べシャフトに大きな負荷がかからず、挿入時の芯振れが発生しにくく、シャフト径が変化しても同一の条件で対応できる利点がある。

さらに、高周波誘導加熱方式は、他の加熱方式と比べて、作業環境への影響が少なく、制御が簡単で、スペースの有効利用が可能となる。特に生産性向上という観点から急速加熱が可能であるという大きなメリットがある [4.8]-[4.9] [4.29]。

4.4 研究目的と検証内容

本研究の目的は、モータ部品生産プロセスの従来工法に代わる、新たに考案した高周波誘導加熱による焼嵌め工法の最適化に関する実現性の検証である。

本事例では、高周波誘導加熱エネルギーの入出力の直線性に着目し、“ロータ・シャフト挿入時のシャフト径と芯振れの入出力関係（線形的比例関係）を理想機能とした機能性評価法（動ベクトル特性）”を提案した。具体的には、入力信号（シャフト径）を変えて特性値である出力（芯振れ量）の直線性を解析し、変化する入力に対する出力が「一定の直線に乗るほど望ましい」特性値（動ベクトル特性）で評価することで、よりロバストな加工条件抽出の可能性を検証した [4.1]-[4.2]。

4.5 実験システム

Fig. 4-5-1 に、本事例における実験システム（焼嵌め工法）のプロセス概要について示す。実践的な工場生産方式を想定して、ロボットアームを採用した自動化システムを考案した。実験手順は、①ロータコアを外周に誘導コイルを巻いたボビンにセットし、高周波誘導により加熱→②ロボットアームでシャフトをハンドリング&ロータコア内径部に挿入→③嵌合したロータ・シャフトを冷却→④ロータ・シャフトの芯振れ量をマイクロゲージで測定した。

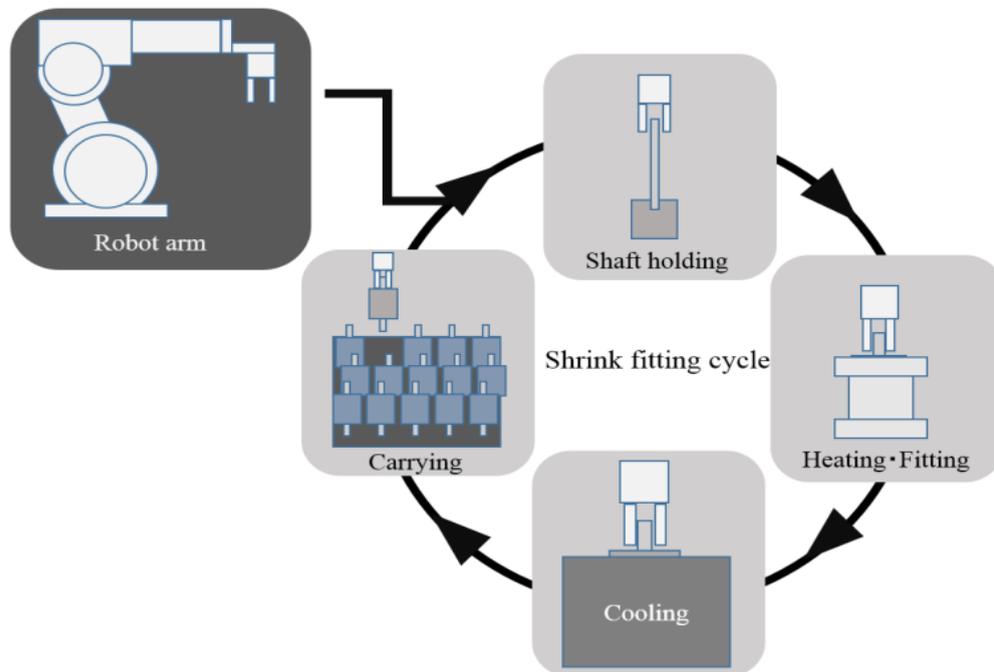


Fig. 4-5-1 Shrink fitting System

4.5.1 実験用テスト機

まず、本実験に使用した実験コイルの作成方法について述べる。コイルはロータコアの収納可能な大きさのボビンに耐熱性が高く絶縁された巻線を巻いた形状で製作した (Fig. 4-5-2)。本実験では、耐熱性の高いテフロン製のボビンを採用し、コイルの巻線には、耐熱性の高いマグネットワイヤを使用した。コイルの巻数は使用する高周波誘導加熱装置の許容インダクタンスに合わせて設定する必要があるため、LCR メーター (Fig. 4-5-3) でインダクタンスを測定しながら調整した。本実験で使用する高周波誘導加熱装置は、IH インバータ (3k W) を採用し、許容インダクタンスは $60\sim 70\mu\text{H}$ である。Fig. 4-5-4 に、インダクタンスの測定結果を示す [4.3]-[4.6] [4.11]。



Fig. 4-5-2 Bobbin and Coil



Fig. 4-5-3 LCR meter

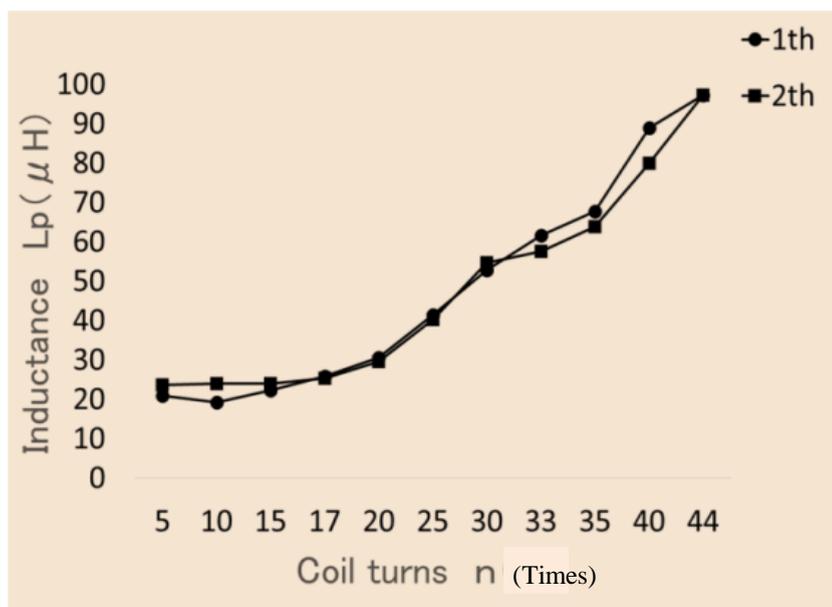


Fig. 4-5-4 Relation of Coil turns and Inductance

4.5.2 高周波誘導加熱の原理・特徴・特性

Fig. 4-5-5 のように、金属の丸棒状（被加熱体）の外周に誘導コイルを配置して高周波電流（交流）を流すと、高周波の磁束が発生する（フレミングの法則）。この磁束が被加熱体を貫通すると、非常に高い電流（うず電流）を誘導し、電気抵抗によって被加熱体の表面でジュール熱が発生して自己発熱が起きる。これが誘導加熱の基本原理である。ここで発生するうず電流は、被加熱体の表面に近ければ近いほど強くなり、逆に内部にいくにつれて指数関数的に弱くなる。これを「表皮効果」という [4.4]-[4.5] [4.7] [4.10]。

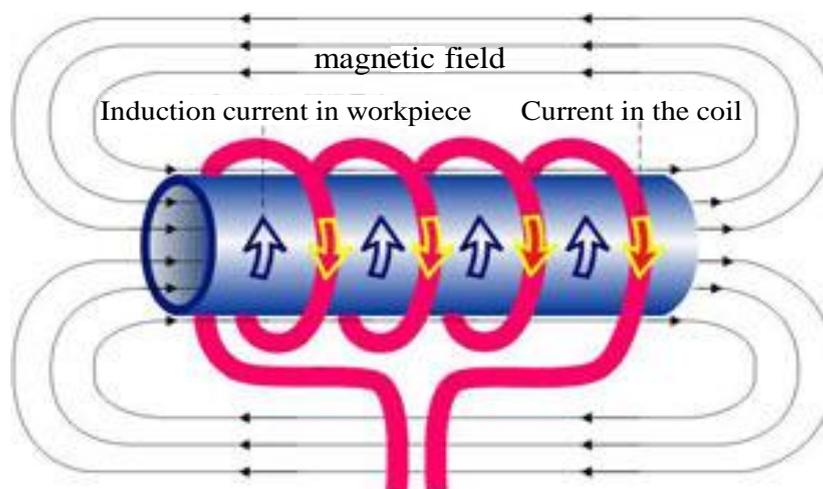


Fig. 4-5-5 Principle of Induction Heating

(1) 誘導加熱現象のメカニズム

1. コイル中に流れる電流により磁界が発生する。
2. 磁界は金属円柱内にも発生する。
3. 金属円柱内にはこの磁界を打消すような方向に電流（うず電流と云う）が流れる。
うず電流は表面に近いほど多く流れる（これが表皮効果である）。
4. このうず電流と金属の電気抵抗でジュール熱が発生する。表面に近いほど電流が多いので発熱量も多くなる。
5. 金属円柱は表面からどんどん昇温して行く。しかし同時に放熱も始まる。
6. 金属円柱の中心部は、表面近くで発生した熱の伝導を受け、表面より少し遅れて加熱されていく。

(2) 高周波誘導加熱装置の特徴

1. 被加熱物の単位面積に供給される単位時間当りのエネルギーが大きいため、高速加熱・高温加熱が可能である。
2. 被加熱物そのものを加熱するので、熱損失が小さく、加熱効率が高い（省エネ）。
3. 出力を変える事により、温度制御が容易となる。
4. コイルの配置と周波数を選定することにより、ピンポイントで被加熱物の表面のみ加熱したり、被加熱物の一部又は全体を加熱する事ができる。
5. 金属溶解などの際は、電磁力によって溶湯が自動的に攪拌（かくはん）される。
6. 自己発熱である為、スケールの発生がきわめて少ない。
7. 外部から被加熱物へ熱を加える必要が無いので、作業環境が良く取扱いが清潔である。

(3) 誘電加熱の特性

他の加熱方式が対流・輻射・伝導による外部の熱源からの熱の移動に依存するのに対し、誘電加熱では被加熱物自身の発熱によるという、その加熱原理に由来する最大の特性を有している。

1. 急速かつ均一な加熱が可能となる。

一般的に電気的良好な絶縁体である誘電体は同時に熱伝導率が小さく、他の外部加熱方式では被加熱物自体の熱伝導による内部の昇温にはそれなりの時間を要するが、物質自体の発熱による誘電加熱では「熱の移動」を要しないので、被加熱物全体の急速な昇温が可能となる。

2. 加熱効率が良好である。

原理的に被加熱物自体が昇温するので炉体や雰囲気など余分なものまで加熱するエネルギーは不要である。電気をエネルギー源としていて、エネルギーコストはガスなど他の熱源より高いが、総合的なエネルギー効率は良好である。

3. 環境にやさしい加熱方法である。

電気がエネルギー源なので、CO₂などの排気・排出物を出さない。総合的なエネルギー効率も良好で、地球環境の保護にも貢献できる。

4. 加熱のレスポンスが良く制御が容易である。

被加熱物自身の発熱であるため、高周波電力の印加に対し温度が迅速に反応する。

5. 選択加熱が可能である。

発熱が物質自体の特性{誘電体内の消費エネルギー損失係数(比誘電率 ϵ_r と誘電体力率 $\tan \delta$ の積)}に依存するので、選択加熱が可能となる。尚、損失係数は誘電体の種類や温度、周波数によって定まる値である。例えば、印刷物の水性インクの乾燥ではベースの紙は加熱されず、インクの水分のみが高周波エネルギーを吸収して発熱・蒸発する。

6. 減圧下や特殊雰囲気での加熱が可能である。

減圧下での誘電加熱による減圧乾燥では水の沸点が低下するため、材料自体の温度を低く押えることが可能であり、材料の変色・変質を嫌う繊維や木材の乾燥に応用されている。また、熱伝導・対流によらないので反応性ガスや不活性ガス雰囲気内での加熱処理に有効である。

7. 被加熱物が誘電体に限定される。

金属のような良好な導電体は、誘電加熱の対照にはならない。被加熱物が誘電体だけではなく金属を含む場合、金属部分が誘導加熱により加熱される事がある。また、金属がある電位を持つフリーな電極とみなされる場合もあり、放電対策など十分な検討と実験が必要である。

8. 誘電体に電界を印加するための電極が必要である。

被加熱物を保持し、電磁波を印加する電極の部分をアプリケーションと呼ぶが、被加熱物の形状や特性・加熱目的などによりさまざまなアプリケーションが実用に共している。また、電極の構造・配置による加熱コントロールが可能であり、逆に不注意に設計された電極では、加熱ムラ発生の原因となることもある。

9. 絶縁や誘導を考慮したアプリケーションが必要である。

電極間、電極周辺に配置される治具・搬送部などが電界の分布に影響するので、システム設計時にこれらに対する配慮が必要である。

10. 強電界中での加熱であるため温度計測の方法に工夫を要する。

非接触の赤外線放射温度計や蛍光ファイバー温度計がよく用いられるが高価であり、きちんと電磁波対策を施せば、熱電対やサーミスタ温度計などでの測温も可能である。

11. 電磁波による他への干渉を考慮する必要がある。

電磁波すなわち電波の応用であるため、関連法規の遵守はもちろんの事、周辺設備への電磁妨害（EMI）に配慮する必要がある。

上記の原理・特徴・特性を考慮して、本研究では、Fig. 4-5-6 に示すような高周波誘導加熱装置の実験システムを構成した。

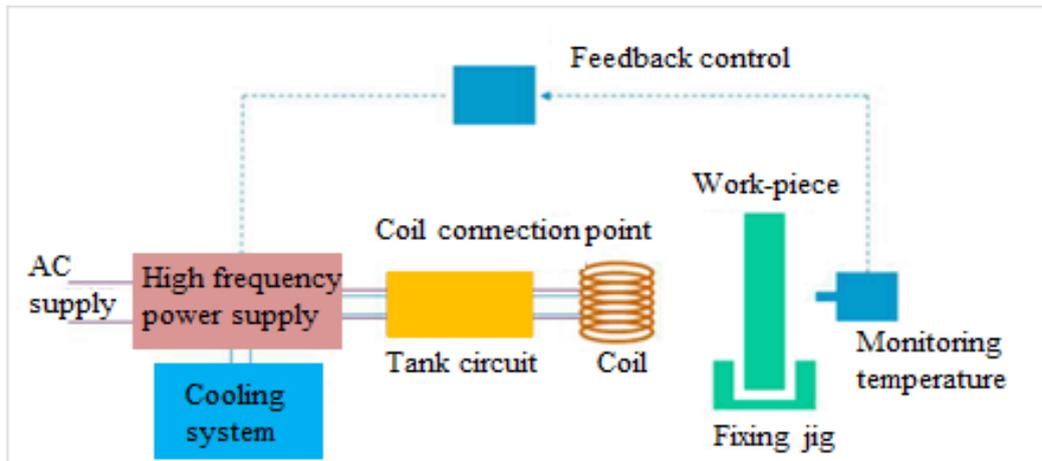


Fig. 4-5-6 System configuration of high frequency induction heating device

4.6 理想機能の設定と動特性評価

4.6.1 新たな理想機能の設定と各種因子の決定

ロータ・シャフトの嵌合において、挿入するシャフト径の変化に伴い、ロータコア内径部の膨張に必要な誘導加熱エネルギーと冷却時の消費エネルギー（熱損失、摩擦抵抗など）がエネルギー原理（エネルギー保存則）の観点から、一定の線形的な関係になることに着目し、Fig. 4-6-1 に示すような理想機能状態を設定した。入力信号を誘導加熱エネルギーパラメータである締め代（ロータコアとシャフトの相対的クリアランス）とシャフト径とし、出力信号はロータコアの冷却時における消費エネルギーパラメータであるロータ・シャフトの芯振れ量を特性値として動ベクトル特性評価を実施した。

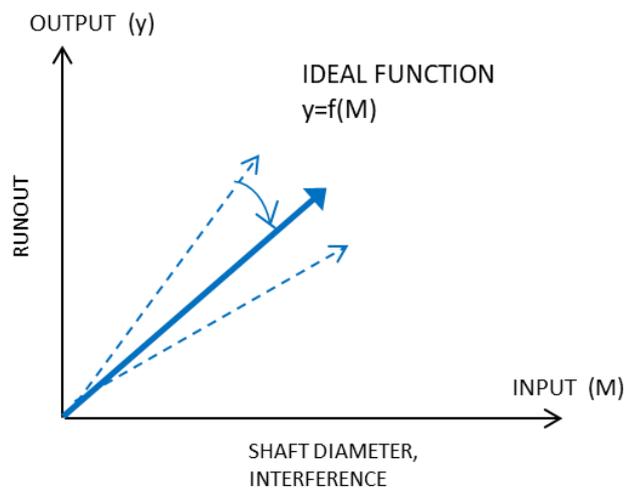


Fig. 4-6-1 Ideal Function

Table 4-6-1 に本実験の各種因子を示す。制御因子(Control factor ; A~D)は、ロータ・シャフトの焼き嵌め条件{A ; 高周波電源パワー負荷率(IND power [%])と高周波コイル加熱時間(Heating time [s]), B ; コイルの治具形状(Coil type [-]), C ; シャフト挿入後の放置時間(Leave time [min]), D ; ロータ・シャフトの冷却方法(Cooling system [-])}を各水準に割付し、信号因子(Signal factor ; M1, M2, M3)は、外径の異なるシャフト径 $\phi 12$, $\phi 12.5$, $\phi 15$ の3種とし、誤差因子(Noise factor ; N1, N2)は、シャフトの締め代である 30μ と 60μ の2種とした。

Table 4-6-1 Various factors

Control factor	Symbol
IND power(%) Heating time(s)	A
Coil type	B
Leave time(min)	C
Cooling system	D

Signal factor	M1	M2	M3
Shaft diameter	$\phi 12.0 \text{ mm}$	$\phi 12.5 \text{ mm}$	$\phi 15.0 \text{ mm}$

Noise factor	N1	N2
Interference	30μ	60μ

4.6.2 エネルギー比型 SN 比

パラメータ設計で用いられている従来型 SN 比（ばらつきの尺度）は、入力信号の大きさ（範囲）やデータ数によって変化してしまうことがあり、技術者はそれに留意してデータを取得・分析しなければならないという課題点がある。理想機能状態($y=\beta M$)からのばらつきや非線形性を機能の安定性の悪さと考えて評価するのが SN 比の考え方である。

本研究で採用した「エネルギー比型 SN 比」は、品質工学会の公認地方研究会である関西品質工学会の研究メンバーによって研究され、2008年6月に発表された新しい SN 比である[3.21]。あらゆる技術はエネルギーの変換や伝達を伴っていることから、技術開発やその技術レベル評価においてエネルギー的な視点は重要である。エネルギー比型 SN 比は、様々なエネルギーがどのように使われるのかに立脚した技術的な品質の評価尺度（ものさし）である。ここでいう技術的な品質とは、システムに入力されたエネルギーをより多くいつまでも安定して目的（出力）に使用できるかということである[4.31]。

ロータ・シャフトの芯振れ量を特性値とした理想機能状態では、入力信号であるシャフト径の大きさ（ $\phi 12, 12.5, 15$ ）が今後設計変更されることが予想された。そのため本研究では、従来型 SN 比の課題点を考慮し、入力信号の対象間をより公平に比較評価することが可能な「エネルギー比型 SN 比」を採用した。

エネルギー比型 SN 比の算出では、従来型 SN 比と同様に常用対数の 10 倍として、デシベル値(db)で表すことができる。以下にエネルギー比型 SN 比(η_E)の基本計算式を示す。

Table 4-6-2 Data form

		Input signal M				
		M_1	M_2	M_3	...	M_k
Noise factor N	N_1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	...	y_{1k}
	N_2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	...	y_{2k}

	N_n	y_{n1}	y_{n2}	y_{n3}	...	y_{nk}

Table 4-6-2 に示すように、ノイズ因子 n 水準、信号因子 k 水準、ノイズ因子水準 $i(i=1,2,\dots,n)$ 、信号因子水準 $j(j=1,2,\dots,k)$ における出力 y_{ij} が得られたと仮定する。

(1) 全変動成分 S_T

全変動成分は、 nk 個の各データ y_{ij} の 2 乗の和である。これは $y=0$ からの変動を示す。

$$S_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k y_{ij}^2 \quad (4.1)$$

(2) 平均的な傾きの大きさ β_{N0}

入力信号のある動特性では有効成分を平均的な傾きの大きさと考えて、まずノイズ因子 N_i 水準の傾き β_{Ni} を求める。

$$\beta_{Ni} = \frac{\sum_{j=1}^k M_j y_{ij}}{\sum_{j=1}^k M_j^2} = \frac{L_{Ni}}{r} \quad (4.2)$$

$$r \equiv \sum_{j=1}^k M_j^2 \quad (4.3)$$

$$L_{Ni} \equiv \sum_{j=1}^k M_j y_{ij} \quad (4.4)$$

ここで、(4.2) 式の β の分母である信号の 2 乗和は有効除数 r 、分子の信号と出力の積和は線形式 L_{Ni} と呼ばれる。

ノイズ因子水準毎の傾き β_{Ni} から、平均の傾き β_{N0} は、

$$\beta_{N0} = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_{Ni}}{n} \quad (4.5)$$

(3) 平均の傾きの変動（有効成分） S_β

平均の傾きの変動は、 $y = \beta_{N0}M$ の大きさの2乗和で表され、有効成分として表すことができる。

$$S_\beta = n \sum_{j=1}^k (\beta_{N0}M_j)^2 = n\beta_{N0}^2 \sum_{j=1}^k M_j^2 = nr\beta_{N0}^2 \quad (4.6)$$

(4) 有害成分 S_N

有害成分は、各データと平均の傾きの比例式との差の変動を表し、全変動成分から有効成分を引くことで求まる。 S_N の中にはノイズ因子水準の違いによる傾きの変動 $S_{\beta \times N}$ と、直線からのずれ、偶然誤差などを含めた誤差変動 S_e のすべてが悪さとして含まれている。

$$S_N = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (y_{ij} - \beta_{N0}M_j)^2 = S_T - S_\beta \quad (4.7)$$

(5) エネルギー比型 SN 比 η_E

SN 比 η_E は、有効成分 S_β と有害成分 S_N の比を常用対数の10倍としてデシベル値(db)で表される。

$$\eta_E = 10 \log \left(\frac{S_\beta}{S_T - S_\beta} \right) = 10 \log \left(\frac{S_\beta}{S_N} \right) \text{ (db)} \quad (4.8)$$

(6) 感度 S_E

SN 比だけではなく有効な出力の大きさを評価する場合の感度は、平均の傾きの大きさ β_{N0} の2乗を常用対数の10倍としてデシベル値(db)で表される。

$$S_E = 10 \log \beta_{N0}^2 \text{ (db)} \quad (4.9)$$

4.6.3 水準表の作成

Table 4-6-3 に本実験の水準表を示す。「A ; IND power (%)・Heating time (s)」の3つの水準は、高周波誘導加熱装置で予備実験を行った結果から抽出したものである。コイル冶具形状は、巻幅の短いもの、標準のもの、長いものの3つとした。この水準表から、実験計画を組むために最適化手法の統計ツールである「直交表」を作成した [4.30]。

Table 4-6-3 Table of level

Control factor	Symbol	Level		
		1	2	3
IND power(%)	A	30	60	90
Heating time(s)		240	120	95
Coil type	B	Short	Standard	Long
Leave time(min)	C	0	0.5	1
Cooling system	D	Air	Water	Mist

4.6.4 直交表への割付と実験データ

Table 4-6-4 に水準を割り付けた L9 直交表・実験データを示す。直交表とは、実験の水準の組合せにおいて、任意因子の水準の組合せが同数回現れるような割付けを定めた表である。実験回数は直交表の規模によって決まり、直交表の左端に示された実験 No.によって表わされる。今回の実験回数は $9 \times 6 = 54$ 回で、横方向の上段は割付けられた制御因子の種類を表わす。その下に羅列された数値、文字がそれぞれの制御因子の水準を表わす。直交表を使用するメリットは、実験回数の削減である。実験データは、ロータ・シャフトの芯振れ量（単位； μm ）である。Fig. 4-6-2 に、各実験 No.毎のシャフト径（入力；横軸）と芯振れ量（出力；縦軸）の実験結果のグラフを示す。グラフから入力であるシャフト径と出力である芯振れ量の線形関係がロータ・シャフトの芯振れ低減と安定化に関わるばらつきの特性評価要素であることがわかる。

Table 4-6-4 Orthogonal array (L9) / Experimental results

Exp.No.	A	B	C	D	M1:12.0		M2:12.5		M3:15.0	
	IND power(%) Heating time(s)	Coil type	Leave time(min)	Cooling system	N1	N2	N1	N2	N1	N2
1	30・240	Short	0	Air	16	1	5	4	13	4
2	30・240	Standard	0.5	Water	6	12	4	1	3	2
3	30・240	Long	1	Mist	12	10	10	8	10	8
4	60・120	Short	0.5	Mist	4	4	6	4	2	7
5	60・120	Standard	1	Air	10	10	14	4	12	10
6	60・120	Long	0	Water	3	3	1	3	4	1
7	90・95	Short	1	Water	4	4	15	7	9	7
8	90・95	Standard	0	Mist	8	16	1	4	3	5
9	90・95	Long	0.5	Air	4	4	4	6	6	8

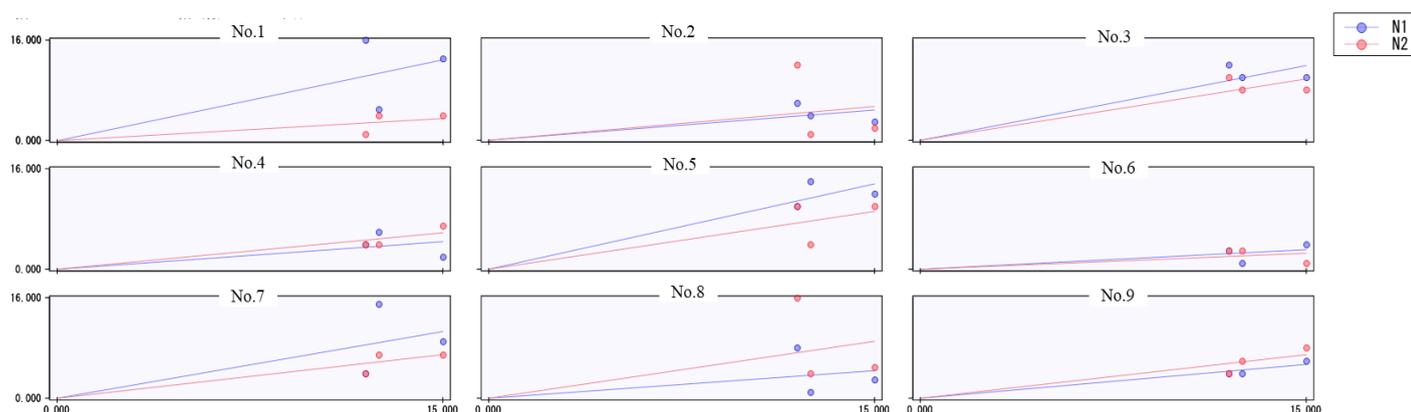


Fig. 4-6-2 Output plot data

4.6.5 SN比と感度の算出

本節では、シャフト径と出力である芯振れ量の線形関係がロータ・シャフトの芯振れ低減と安定化に関わる最適な加工条件の抽出を目的機能とした「動ベクトル特性（エネルギー比型 SN 比）」で SN 比と感度を算出した。「動ベクトル特性」は、入力を変化させて出力を調べる特性で、様々な因子の組合せの中で、入力と出力の2次元的なばらつきが最小となる条件を評価する方法である。

Table 4-6-5 に本実験データから算出した SN 比と感度の値と計算過程を示す。尚、本実験で算出した感度は、特性値（芯振れ量）の大きさに対する入力パラメータの影響度を表している。

Table 4-6-5 SN ratio and Sensitivity, Calculation process

Exp.No.	傾き	有効除数	平方和					真数	デシベル値		
	β	r	ST	$S\beta$	$SN \times \beta$	Se	SN'	$S\beta/SN'$	$S\beta/r$	SN ratio	Sensitivity
1	0.5	1050.5	483	310.91	102.1	69.99	172.09	1.807	0.296	2.569	-5.288
2	0.3	1050.5	210	118.96	0.36	90.68	91.04	1.307	0.113	1.161	-9.46
3	0.7	1050.5	572	548.39	5.94	17.67	23.61	23.224	0.522	13.659	-2.823
4	0.3	1050.5	137	120.64	2.38	13.98	16.36	7.376	0.115	8.678	-9.399
5	0.8	1050.5	656	601.64	22.87	31.49	54.36	11.068	0.573	10.441	-2.421
6	0.2	1050.5	45	36.94	0.38	7.68	8.06	4.585	0.035	6.614	-14.539
7	0.6	1050.5	436	355.37	16.09	64.54	80.63	4.408	0.338	6.442	-4.707
8	0.4	1050.5	371	210.73	25.45	134.82	160.27	1.315	0.201	1.189	-6.977
9	0.4	1050.5	184	176.83	2.88	4.29	7.17	24.666	0.168	13.921	-7.738

4.6.6 要因効果の分析

Fig. 4-6-3 に制御因子毎の SN 比と感度を要因効果図で表し、入力に対する出力の理想機能状態からのばらつき効果を評価した。Fig. 4-6-3 の上下それぞれの縦軸は、SN 比及び感度の値を示す。この線図の意味は、上下に大きく SN 比が広がっている制御因子が焼嵌めにおけるシャフトの芯振れ量低減と安定化に効果があることを示している。最終的に最適と判断した水準は、それぞれ丸で囲まれた部分の因子「IND power・Heating time:60(%)・120(s)」、「Coil type : Long(-)」、「Leave time:1(min)」、「Cooling system : Air(-)」である。

実験において最適と思われる制御因子水準の組み合わせの抽出結果を Table 4-6-6 に示す。尚、機能性評価において、これは L9 直交表の実験結果から得られた抽出結果であり、確認実験による実験の信頼性と再現性についての評価が必要である。

最適条件 SN比(推定値)=17.575 感度(推定値)=-4.501
 現行条件 SN比(推定値)=2.569 感度(推定値)=-5.288
 利得 SN比(推定値)=15.006 感度(推定値)=0.786

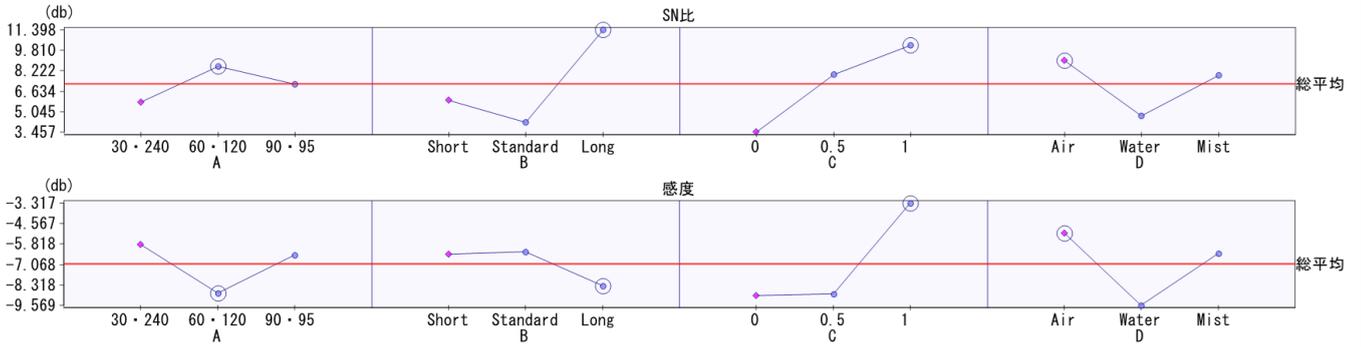


Fig. 4-6-3 Factor effect diagram

Table 4-6-6 Optimum condition

IND power(%) Heating time(s)	Coil type	Leave time(min)	Cooling system
60 120	Long	1	Air

4.6.7 実験の信頼性と再現性の評価

(1) L9 直交表実験の信頼性評価

Table 4-6-7に、ロータ・シャフトの芯振れ低減と安定化に関して、本実験範囲における最適条件、ベンチマーク条件(BM)における因子水準の組み合わせと推定値の算出結果を示す。最適条件の推定値が BM 条件よりも高く、利得が確保されている結果を基に、L9 直交表実験結果に信頼性（加法性）があるかどうかを確認した。

判定方法は統計学的経験則から、L9 直交表で得られた SN 比の最大値と最小値を求め、その差の10%の値から推定した BM 条件の SN 比との差が、この10%の範囲内であれば、信頼性（加法性）があると判断できる[4.14]- [4.15]。

Table 4-6-8 に信頼性の評価結果(10% of diff. 1.276 > -3.339)を示す。シャフト径（入力）と芯振れ量（出力）の線形関係のばらつきを評価し、選定した最適条件の水準は、ロータ・シャフトの芯振れ低減と安定化に関して望ましい条件であり、L9 直交表実験には信頼性があると判断できた。 [4.16]- [4.20]。

Table 4-6-7 Optimum results

条件	A	B	C	D	推定値			利得	
					SN比	感度	傾き(絶対値)	SN比	感度
最適	60・120	Long	1	Air	17.575	-4.501	0.596	15.006	0.786
BM	30・240	Short	0	Air	10.525	-5.288	0.544		

Table 4-6-8 Reliability confirmation of L9 experiment

L18 experiment SN ratio		Reliability confirmation by estimation	
Maximum	13.921	Average SN ratio of L18 experiment	7.186
Minimum	1.161	Estimate value of BM condition	10.525
10% of difference	1.276	>	-3.339
Judgment		Reliable	

(2) 確認実験による再現性評価

確認実験の目的は、直交表実験と比較して時や場所や環境などが変化しても、再現するかどうかを確認することである。もし再現性がなければ、今後なんらかのトラブルを起こす可能性が高い品質上の不良技術であるといえる。確認実験のデータ解析結果を Table 4-6-9 に示す。確認実験では、選択された最適条件と BM 条件の SN 比の推定値を求めて、再度直交表実験と同じ 2 種類に関して実験を行って SN 比を取得し、両者の推定値の差と確認実験の差（利得）を比較して、今回の実験には再現性があるかどうかを検証した。Table 4-6-10 に確認実験における再現性の評価結果を示す。機能性評価における確認実験での再現性有無の条件は、利得の再現性(%)が 70%から 130%の範囲内に、あるいは利得の差(db)が±3db 以内であれば、「再現性がある」と判断できる。確認実験において、再現性を利得で判断する狙いは、仮に環境が異なっても制御因子の改善効果は、設定した理想機能に対する一貫性を持って再現するべきであるという統計学的な経験値に基づく考え方である。最適条件の推定値と確認実験の利得の差が約±30%の範囲内であれば交互作用の影響を受けにくいシステムであり、実験効果の再現性が得られると判断できる [4.21]-[4.28]。Table 4-6-10 の結果(Repro. $70\% \leq 77\% \leq 130\%$, Gain diff. $-1.604 \leq \pm 3\text{db}$)から、本実験は再現性を有すると同時に、BM 条件に対する芯振れ低減率 56%の改善効果となった。また、Table 4-6-11 の BM 条件に対する SN 比利得の改善効果として、エネルギー損失 71%低減と芯振れ量の安定性が 1.87 倍向上した。Table 4-6-7 及び Table 4-6-8 の信頼性評価結果から、総合的に直交表実験には信頼性があり確認実験における再現性有無の解析評価結果は妥当であると判断できた。

また、本実験の最大の目的は、設定した理想機能に基づいた焼嵌め工法に実現性が成立するかどうかを見極めることである。Fig. 4-6-4 は、確認実験での最適条件と BM 条件の入出力のバラツキ度合を比較したグラフである。ロータコアとシャフトの締め代（誤差因子）の入力（シャフト径；信号因子）に対する出力（芯振れ量；特性値）の変化を表し、最適条件の方が BM 条件よりもばらつきが少なく安定した線形的な比例関係であり、品質規格（芯振れ量の上限值；8 μm 未満）を満足していることがわかる。

この結果から、焼嵌め工法が従来工法に比べて、理想機能で設定したエネルギー原理（エネルギー保存則）の観点から、シャフト径の変化に対応できるロバスト性のある工法であることが明らかになった。

Table 4-6-9 Confirmation experiment data

確認実験データ ; 芯振れ量 (μm)																	
	M1		M2		M3		有効除数 全変動成分		傾き βNi		傾き平均値		有効成分 有害成分		真数		SN比
	N1	N2	N1	N2	N1	N2	r	ST	N1	N2	$\beta N0$	S β	SN	S β /SN	S β /SN	η	
BM条件	3.5	1	8	10	12	15	525.25	546.25	0.613	0.689	0.651	445.365	100.885	4.415	6.448	6.448	
最適条件	0.5	1	1.2	1.4	1.8	2.2	525.25	12.73	0.091	0.119	0.105	11.623	1.107	10.502	11.894		

Table 4-6-10 Reproducibility of confirmation

SN ratio [db]			
Condition	Estimated	Confirmation	Reproducibility
BM	10.525	6.448	61%
Optimum	17.575	11.894	68%
Gain	7.05	5.446	<u>77%</u>
Repro.	70% \leq	<u>77%</u>	\leq 130%
Gain diff.	<u>-1.604</u>	$\leq \pm 3db$	
Judgment	Reproducible		
Runout reduction rate	<u>56%</u>		

Table 4-6-11 Improvement rate of SN ratio gain for BM condition

Energy loss		Stability	
σ^2		σ	
29%	1/3.50	53%	1/1.87
<u>71%</u>	Reduction	<u>1.87 times</u>	Improvement

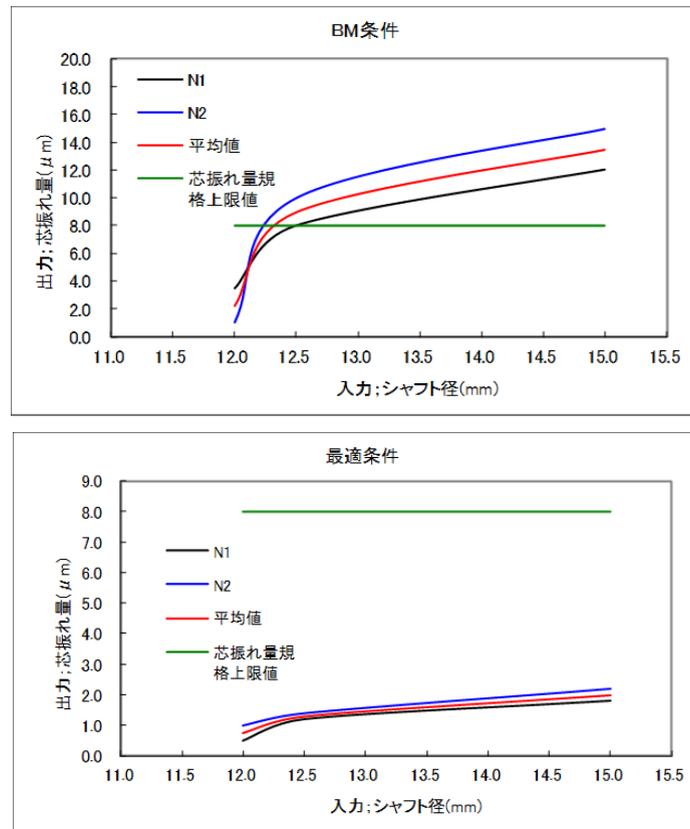


Fig. 4-6-4 Comparison of variation

4.7 研究成果と今後の課題

本事例では、従来工法に代わる高周波誘導加熱による焼嵌め工法を考案し、品質工学の代表的手法であるパラメータ設計の適用による誘導加熱エネルギーの入出力信号の直線性を理想機能とした“機能性評価法「動ベクトル特性」”を提案し、焼嵌め工法の実現性の可否について検証した。今回の新しい提案に対して、直交表実験の結果からエネルギー比型 SN 比を求め、要因効果図から最適な加工条件水準の組み合わせを抽出することができた。最終的には、確認実験により焼嵌め工法が実践的に適用可能であり、従来工法よりも有意性があり、品質確保が技術的に保障できるということが明らかになった。

研究成果として、誘導加熱エネルギーの直線性を理想機能とした「機能性評価（動ベクトル特性）」の適用により、「芯振れ量 56%低減（高品質）」と高周波誘導加熱技術の採用による「生産可動率 10%向上（高生産性）」、さらには、省人化とエネルギー損失低減化による「製造原価 30%削減（低コスト化）」を同時に達成することができた。

本論文としての課題は、誘導加熱によるロータコアの熱減磁効果という危険因子とモータ性能への関連性に関する性能評価である。モータの高効率化および高出力化を実現するには、温度上昇の問題を如何に解決するかが重要となる。温度に対する特性変化が大きいのはロータコアである。特にモータが過負荷状態で大きなトルクを出している場合では、減磁の可能性が高まる。ロータコアは、温度上昇により残留磁束密度や保磁力ともに低下するが、高温環境での保磁力を確保する必要がある [4.12]-[4.14]。

また、異種ロータコアの危険因子（高温での熔融や減磁効果など）がモータ機能上想定されるが、本研究成果を踏まえて今後の研究課題として取り組む予定である。

参考文献

- [4.1] 田口玄一：“実験計画法と品質工学”，品質工学，Vol.2, No.1, pp.2-8, (1994).
- [4.2] 矢野耕也：“品質工学の基礎とパラメータ設計”，精密工学会誌，Vol.81, No.11, pp.1008-1012, (2015).
- [4.3] 岡田幸弘，河瀬順洋：品質工学と多変量解析法による磁石埋め込み形モータの最適設計，電気学会論文誌 D，Vol.123, No.12, pp.1516-1522, (2003).
- [4.4] 杉本慎治，小村昭義，木村守，西澤和雄，小池正敏，増田誠吉：“ロバスト感度解析を用いた誘導電動機の時間・空間高調波損失低減に関する検討”，電気学会論文誌 D，Vol.135, No.10, pp.993-998, (2015).
- [4.5] 小林誠一：“ダイレクトドライブモータ”，精密工学会誌，Vol.69, No.11, pp.1534-1537, (2003).
- [4.6] 池上貴一，廣垣俊樹，青山栄一：品質工学の手法を導入した工作機械用の同期モータの設計法の考察，THE HARRIS SCIENCE REVIEW OF DOSHISHA UNIVERSITY，Vol.57, No.4, pp.225-230, (2016).
- [4.7] 中条孝則：IH による缶飲料加熱の最適化，品質工学会誌，Vol.8, No.6, pp.62-67, (2000).
- [4.8] 大澤泰樹，畔柳和好，米盛弘信：「誘導加熱による異形状アルミニウム合金の間接加熱装置に関する基礎検討」，平成 23 年度電気設備学会全国大会講演論文集，pp.327-328, (2011).
- [4.9] 大澤泰樹，畔柳和好，米盛弘信：「誘導加熱による異形状アルミニウム合金の間接加熱装置に関する基礎検討－簡易供試装置による被加熱対象物の温度分布－」，第 3 回大学コンソーシアム八王子学生発表会要旨集，pp.302-303, (2011).
- [4.10] 大澤泰樹，畔柳和好，米盛弘信：「誘導加熱装置」，特許出願 2012-265103, (2011).
- [4.11] 豊田美帆，藤井誠 他：IH 定着装置の試作レス開発，KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, Vol.6, pp.47-51, (2009).
- [4.12] 榎本裕治 他：新締結方法を採用した外転型磁石モータの小型・高効率化，IEEE Trans. IA, Vol.124, No.6, pp.529-534, (2004).
- [4.13] 森輝雄：タグチメソッドをつかった最適工学講座 3 新最適化工学入門，トレンドブック，(1990).

- [4.14] 開道力：「鉄心素材と使用条件を考慮したモータの解析」，日本能率協会 磁気応用技術シンポジウム，(1998).
- [4.15] 田口玄一：品質工学講座 1「開発・設計段階の品質工学」，日本規格協会，(2002).
- [4.16] 矢野宏：品質工学入門，日本規格協会，pp.128-145，(2002).
- [4.17] 森輝雄：タグチメソッドをつかった最適化工学講座 5「やさしいタグチメソッドの応用と数理」，トレンドブック，pp.39-85，(2005).
- [4.18] 田口玄一：品質工学講座 5 品質工学事例集 日本編一般，日本規格協会，pp.223-240，(1992).
- [4.19] 矢野宏：技術者力を高める 品質工学入門，日本規格協会，pp.79-122，(2011).
- [4.20] 鶴田明三：設計・開発現場の品質工学「エネルギー比型 SN 比」，日科技連，pp.13-114，(2016).
- [4.21] 越水重臣，鈴木真人：バーチャル実験で体得する「実践・品質工学」，日刊工業新聞社，pp.17-56，(2007).
- [4.22] 渡部義晴：実践 タグチメソッド，日科技連，pp.1-71，(2006).
- [4.23] 井上清和 他：入門パラメータ設計，日科技連，pp.9-30，(2008).
- [4.24] 小野元久：基礎から学ぶ品質工学，日本規格協会，pp.49-118，(2013).
- [4.25] 長谷部光雄：ベーシックタグチメソッド，日本能率協会マネジメントセンター，pp.75-99，(2009).
- [4.26] 鶴田明三：超実践 品質工学，日本規格協会，pp.34-191，(2017).
- [4.27] 鈴木真人：難しくない品質工学，日刊工業新聞社，(2016).
- [4.28] 長谷部光雄：品質工学の考え方，日本規格協会，pp.89-112，(2013).
- [4.29] 植村浩：「最近の誘導炉技術」，工業加熱，Vol.44，No.6，pp.9-17，(2007).
- [4.30] 広瀬健一，上田太一郎：Excel でできるタグチメソッド解析法入門，同友館，pp.1-24，(2015).
- [4.31] Eiji Toma, Hiroshi Tanaka, Kazushige Kikuta: Optimization of Flight Performance of PET Bottle Rockets by Integrated Analysis of Dynamics Simulation System and Parameter Design, Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers, vol.7, no.2, pp.59-71, (2019).
- [4.32] Eiji Toma: Optimization of rotor shaft shrink fit method for motor using “Robust design”, Journal of Industrial Engineering International, vol.14, issue4, pp.705-717, (2018).

第 5 章 「パターン認識 MTS 法」を適用した冷却用モーターファンの判別分析法の有効性に関する研究

5.1 検証事例(4)

テーマ： 品質検査分野における高信頼性と高度な判定を実行するパターン認識 MTS 法に“融合評価特性と閾値設定法”を新たに適用した品質検査プロセスの最適化

5.2 研究課題と概要

モノづくりの生産工程における品質検査（外観検査含む）は、ほとんどが人間（検査員）による官能検査法が主流である。検査員の体調や環境変化の影響により判定にばらつきが発生するという問題が存在し、定量的かつ自動的に判別可能な解析手法の開発が求められている。

そこで本論文では、IT 機器の軽量化により需要が増加傾向にある電子機器内部の冷却用モーターファンの品質検査プロセスの最適化を事例として取り上げて、新たな提案に対してその有効性を検証した。製造現場におけるモーターファンの品質検査の課題として、検査員による官能検査法（検査員はファンフレームの側面の二ヶ所を保持し、手首を回しながら耳元近くで聴覚と触覚により診断）が主流であり、この方法では、ファンの微妙な放射音（音圧）の違いを正確に診断するために、多くの経験を必要とし、検査員の体調や環境の変化によっては、判定にばらつきが発生することが挙げられる。これら品質上の問題を解決するためには、ファンの音圧・振動レベルを定量的に判別診断できる解析法の開発が求められている。

本事例では、品質工学手法の中で、検査事象の異常/正常判定を行う「パターン認識 MTS 法」に、最適なパターン認識可能な情報に合理化するために、SN 比を MD に融合した“新たな評価特性”の適用と、数理的証明による“MTS 法の閾値設定法”を提案し、正常・異常の判別精度の適正化に関する有効性を検証した。

5.3 検証の目的

従来からのファン騒音（回転音と乱流音）低減については，羽根枚数の検討および羽根形状の最適化に関する流れ解析からの研究がなされている [5.34]。

また，小型モーターファンの音圧・振動波形を周波数分析し，正常・異常ファンに現れるパターン認識技術の適用による特徴量（判別認識に有益な情報）を調査した研究も報告されている [5.44]-[5.50]。

しかしながら，音圧と振動で得られる測定値や解析結果から適切な正常・異常の判別診断が難しく，どの特徴量が正常・異常の検出に有効であるかの明確な検証には至っていないのが現状である [5.1]-[5.2]。

そこで本論文では，モーターファンの音圧と振動の測定データに，MTS法（マハラノビス・タグチ・システム）という波形パターンの形状情報から特徴量を抽出する解析法に，“新たな評価特性”の適用と“閾値設定法”を提案し，得られた特徴量による判別精度の適正化に関する有効性を検証した [5.10] [5.32]。

5.4 解析原理

5.4.1 パターン認識 MTS 法

パターン認識は、未知の入力パターンがあらかじめ入力されている標準パターンにどれだけ似ているかを数値で評価し、どのカテゴリに属するか判断する情報処理技術である。本事例では、パターン認識の手法として、MTS法を採用した。MTS法は、基準となるパターンのデータ群を単位空間として構成し、マハラノビス距離（MD）という評価指標により単位空間からの外れ度合を求め、対象データが単位空間に属するか否か（正常/異常）を判別分析する手法である [5.30] [5.39]-[5.42]。

Fig. 5-4-1 に示すように、MD が小さければ単位空間に近いパターン、MD が大きければ単位空間から遠いパターンであると判定することができる。

マハラノビス距離とは、インドの統計学者マハラノビス博士によって考案されたもので、複数の変数が複雑に絡み合っている多変量の情報を、距離という1つの情報に変換した結果である [5.31]-[5.38] [5.43]。

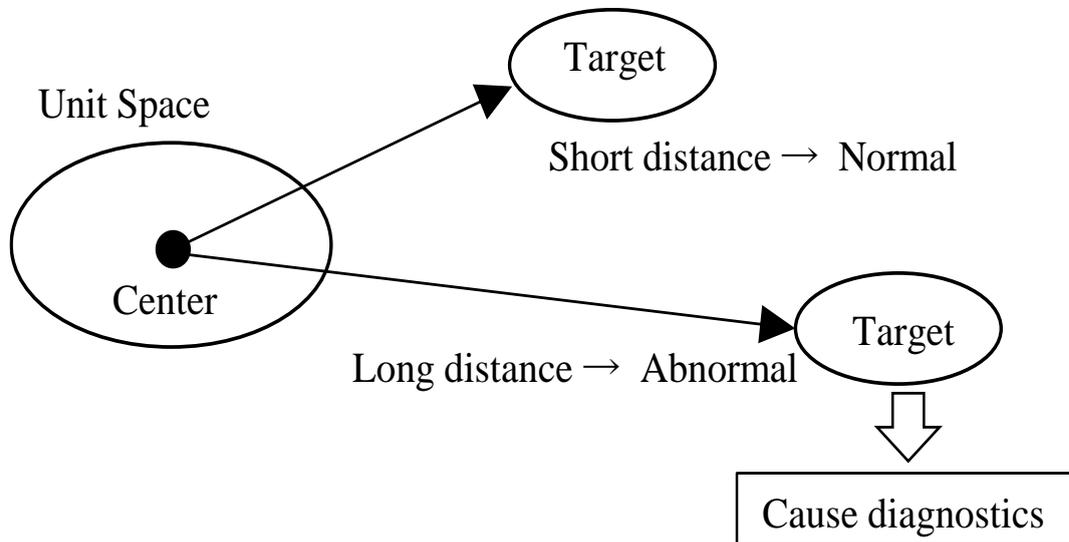


Fig. 5-4-1 Conceptual drawing the MTS

5.4.2 MTS 法の計算式

本節では、MTS 法の計算式について説明する [5.3] [5.7] [5.13]-[5.16]。

(1) 単位空間のデータと平準化

単位空間のデータとして、 k 変数、 n サンプルが Table 5-4-1 のように得られたとする。表には各変数の平均値と標準偏差も示してある。

Table 5-4-1 Unit data

Sample No.	Variable				
	1	2	3	...	k
1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	...	x_{1k}
2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	...	x_{2k}
3	x_{31}	x_{32}	x_{33}	...	x_{3k}
...
N	x_{n1}	x_{n2}	x_{n3}	...	x_{nk}
Average	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	...	\bar{x}_k
Standard deviation	σ_1	σ_2	σ_3	...	σ_k

各変数 x_j について、次の規準化値 X_j を計算する。

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k) \quad (5.1)$$

規準化したデータを改めて Table 5-4-2 に示す。規準化後の各変数の平均値 X_j は 0、標準偏差は 1 となる。なお、MTS 法における標準偏差 σ は、各変数 x_j について、全データを母集団とする以下の計算式によって求める。すなわち、自由度を全データ数によって、単位データの MD の平均値が 1 となる。

一般に標準偏差の計算では、“ σ ” という記号は母標準偏差の記号として使用するが、本論文では、あえてデータから求める標準偏差の記号として使用する。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.2)$$

Table 5-4-2 Normalized data

Sample No.	Variable				
	1	2	3	...	k
1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	...	X_{1k}
2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	...	X_{2k}
3	X_{31}	X_{32}	X_{33}	...	X_{3k}
...
n	X_{n1}	X_{n2}	X_{n3}	...	X_{nk}
Average	0	0	0	...	0
Standard deviation	1	1	1	...	1

(2) 相関行列および逆行列の計算

Table 5-4-2 の k 種類の変数について、相関行列 \mathbf{R} を計算する。相関行列は、 $k \times k$ の正方行列であり、成分 r_{ij} は変数 i と変数 j の相関係数である。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & r_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$r_{ij} = \frac{\sum(X_{pi} \times X_{pj})}{n} \quad (p = 1, \dots, n) \quad (5.4)$$

次に、相関行列 \mathbf{R} の逆行列 \mathbf{R}^{-1} を計算し、これを行列 \mathbf{A} とする。

$$\mathbf{A} = \mathbf{R}^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

(3) マハラノビス距離の計算

未知（対象）データの変数組,

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_k) \quad (5.6)$$

が得られたとき, この変数組のマハラノビス距離は, \mathbf{y} を(5.1)式により \mathbf{Y} に規準化して, これを,

$$\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_k) \quad (5.7)$$

とした後,

$$D^2 = \frac{\mathbf{YAY}^T}{k} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} Y_i Y_j / k \quad (5.8)$$

で求める。(5.8)式にあるように, MTS法では距離を項目数 k で割っている。なお, このとき求められたマハラノビス距離(MD)は, 2乗の値 D^2 である。

5.5 新たな提案と解析手順

MTS 法の適用において、単位空間の構成アイテム、項目（変数）の定義，さらには計測方法などが、パターン認識精度を大きく左右する。本事例では、得られた波形情報を的確に合理化するために、パターン認識における良否の判別精度の適正化に関して、新たに SN 比と MD を融合した“有効性解析による特性評価法”の適用を提案した。

本事例のように、複雑な波形データが多数存在する場合には、「大きいほど望ましい特性」を SN 比と MD で数量化することで、より判別精度の適正化が図れると考えた。

本事例で適用した SN 比 (η) の計算式を(5.9)式に示す。このとき、SN 比は大きいほど有効性が高く、 D^2 はマハラノビス距離（2乗の値）， k は単位空間に属さない信号データの数である [5.1]。

$$\eta = -10 \log \left\{ \frac{(1/D_1^2 + 1/D_2^2 + \dots + 1/D_k^2)}{k} \right\} \quad (5.9)$$

閾値の設定法については、MTS 法で算出した MD の 2 乗は、“ χ^2 （カイ二乗）分布に従う”という統計学的な根拠と数理的証明に基づき、“ χ^2 （カイ二乗）分布を用いた閾値設定法”の適用を提案した。

新たな提案「手順(3)、(5)に明記」に対して、モーターファンの正常/異常の判別精度の適正化に関する有効性について、以下の放射音と振動の波形解析手順で検証した [5.21]-[5.23]。

(1) 特徴量の抽出

波形の特徴化を行うために、抽出幅と標本線を設定し、特徴量として変化量と存在量を抽出する。

(2) 単位空間の作成

単位空間は複数のサンプルとそれらの変数（特徴項目）からなるが、MT 法では単位空間におけるサンプルの数は変数の数よりも多くなければならないという条件があり、変数の 3 倍以上が理想とされている。

(3) 閾値の設定

本事例では、 χ^2 分布に従い、確率 5% の値で閾値を決定する方法を適用（本事例に採用した MTS 法では、ある事象が起こる確率が 5% 以下であるとき、 k 個の項目

で計算した MD の 2 乗の値が、有意水準 5% の χ^2 の値よりも大きくなるサンプルはめったにない事象と推定することが可能で、閾値の設定に関して妥当性があると判断) した。Fig. 5-5-1 に、 χ^2 分布に従う MD の閾値と項目数関係を示す。

(4) 対象データの MD 計算

異常品のファンについても波形解析を行い、単位空間と同様の特徴量を抽出して、式 (5.8) により MD 値を算出する。

(5) SN 比と MD 値の融合による有効性解析

有効性解析とは、どの項目が異常検出に有効かを SN 比と MD 値によって評価する処理である。

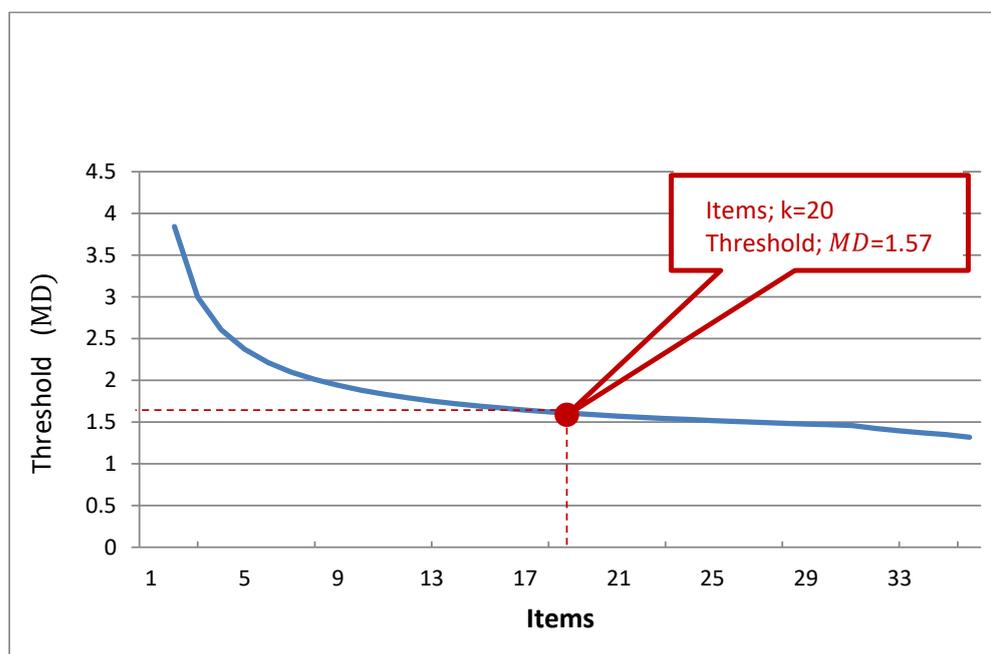


Fig. 5-5-1 Relationship between the number of items according to χ^2 distribution and threshold

5.6 判別方法

5.6.1 MDと閾値

MTS法では、対象データのMDと閾値の比較によって正常/異常を決定する[5.50]。つまりMDが1に近く小さい場合は、単位空間に属すると判定し、設定した閾値を超えてMDが大きい場合は、単位空間に属しないと判定する [5.17]-[5.18]。

MTS法における判定の閾値は、目安として4が良いと言われている[5.14]。これは、統計数理上MDが4を超えると、対象データが単位空間に属する確率が小さくなるからである。しかし、現在ではMT法における閾値の決定方法に関する研究も報告されている[5.50]。正規分布にしたがう k 個の項目の関係から計算されたMDの2乗値の集団は、統計学における「自由度 k の χ^2 (カイ2乗) 分布にしたがう」ことが知られている[5.43]。 χ^2 分布にしたがう分布では、ある χ^2 の値を決めるとその χ^2 の値より大きい χ^2 の値をとる事象の確率が決まる。 χ^2 分布でのこのような値を、ものごとの判断をするときの境界値と考えて、統計学では、有意水準と呼んでいる[5.16]。

本研究に採用したMTS法では、ある事象が起こる確率が5%以下であるとき、 k 個の項目で計算したMDの2乗の値が、有意水準5%の χ^2 の値よりも大きくなるサンプルはめったにない事象であり、判別基準である閾値の設定に関して妥当性があると判断した。Fig. 5-6-1は、横軸がMD、縦軸が確率であり、グラフ曲線 (χ^2 分布理論曲線) は、MDの2乗値がとる確率を表している [5.26]-[5.29]。

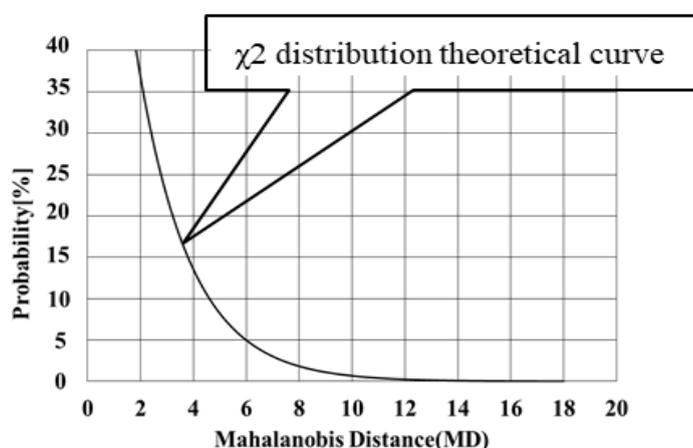


Fig. 5-6-1 Distribution of squared

5.6.2 MD と χ^2 分布の関係

統計数理上、マハラノビス距離 (MD) の分布が、 χ^2 分布にしたがうことを数理的な視点で以下に概要を説明する [5.21]- [5.24]。

Fig. 5-6-2 に示すように、マハラノビス距離は直交座標に変換すると、球対称に分布しているためマハラノビス距離が、 $D_M \sim (D_M + \delta D)$ の範囲にあるデータの数は、(データの密度) \times (球の表面積) $\times \delta D$ である。

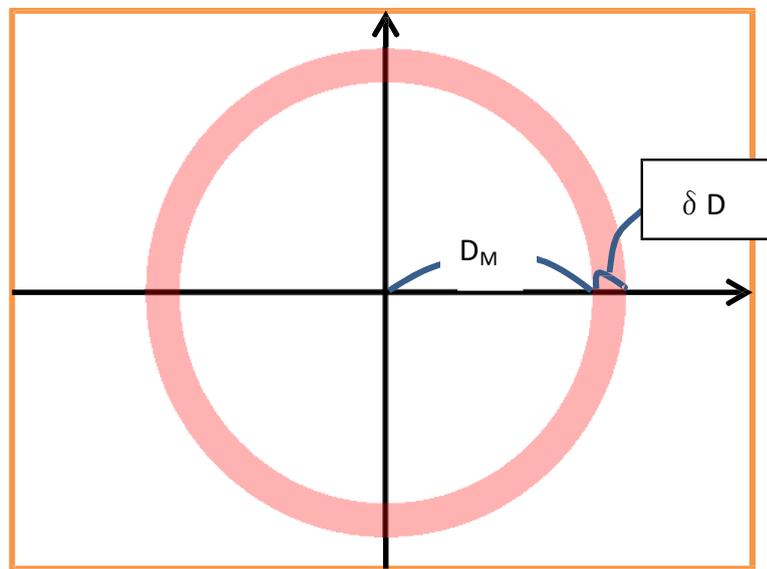


Fig. 5-6-2 Distribution of MD

単位空間のデータは、密度 $\rho(x_1, \dots, x_k)$ で分布しているため、マハラノビス距離が $D_M \sim (D_M + \delta D)$ の範囲にあるデータの数は、(データの密度) \times (球の表面積) $\times \delta D$ である。直交座標でのデータの密度はおおよそ $e^{-\frac{D^2}{2}}$ であり、球の表面積は D^{k-1} に比例するため、マハラノビス距離が $D_M \sim (D_M + \delta D)$ の範囲にあるデータの数は、

$$\propto D_M^{k-1} \cdot e^{-\frac{D_M^2}{2}} \cdot \delta D \quad (5.10)$$

χ^2 分布の確率密度関数は,

$$\frac{1}{2^{k/2}\Gamma(k/2)} \cdot Z^{k/2-1} \cdot e^{-Z/2} \quad (5.11)$$

$$\frac{1}{2^{k/2}\Gamma(k/2)} : \text{定数}$$

で表されるが, (5.9)式において, $r^2 = Z$ と置けば一致する。

以下, 詳細を説明する。

各変数が正規分布であり, 相関行列が \mathbf{R} で与えられるとき, 密度関数は

$$\rho(x_1, \dots, x_k) = \frac{1}{\sqrt{\det 2\pi \mathbf{R}}} e^{-\frac{x_i(\mathbf{R})_{ij}^{-1} x_j}{2}} \quad (5.12)$$

で与えられる。(多次元正規分布において, 変数が基準化されていれば相関行列と共分散行列は同じ。) これは, $x_i \sim (x_i + \delta x_i)$ で囲まれた微小体積要素の中に含まれる単位空間のデータの数と全データの数 n の比を, $n \rightarrow \infty$ としたものが, $\rho(x_i) \delta V$ であることを意味する。

ここで, x_i に以下の座標変換をする。

$$x_i' = \frac{1}{\sqrt{k\lambda_i}} V_{ij}^T x_j \quad V_{ij}^T : \text{固有ベクトルを並べた行列, } \lambda_i : \text{固有値}$$

座標変換して直交座標にすると, この積分は,

$$\sqrt{\frac{k}{(2\pi)^k}} \int d^k x' e^{-\frac{k \sum_i x_i'^2}{2}} \quad (5.13)$$

となる。この積分を極座標表示にすると,

$$r^2 = \sum_i x_i'^2 \quad d^k x' = r^{k-1} dr d\Omega^{k-1}$$

である。

$d\Omega^{k-1}$ は、 k 次元球の表面の微小体積要素であるから、これを用いると(5.12)式は、

$$\sqrt{\frac{k}{(2\pi)^k}} \int dr r^{k-1} \int d\Omega^{k-1} e^{-\frac{kr^2}{2}} \quad (5.14)$$

である。

被積分関数は、 Ω によらないため、 $\int d\Omega^{k-1}$ は半径1の k 次元球の表面積である。
 k 次元球の表面積は、

$$S_k = \frac{2\pi^{\frac{k}{2}}}{\Gamma(k/2)}$$

であるので、(5.13)式は、

$$\frac{2k^{k/2}}{2^{k/2}\Gamma(k/2)} \int dr r^{k-1} e^{-\frac{kr^2}{2}}$$

さらに、 $kr^2 = Z$ と置けば、

$$\frac{1}{2^{k/2}\Gamma(k/2)} \int dZ Z^{\frac{k}{2}-1} e^{-\frac{Z}{2}} \quad (5.15)$$

被積分関数 $\frac{1}{2^{k/2}\Gamma(k/2)} Z^{\frac{k}{2}-1} e^{-\frac{Z}{2}}$ は、まさに χ^2 分布である。

したがって、 r は定義よりマハラノビス距離であるので、MDの2乗の密度分布は、 χ^2 分布であることが示された。

参考までに、自由度と χ^2 分布の関係を Fig. 5-6-3 に示す。

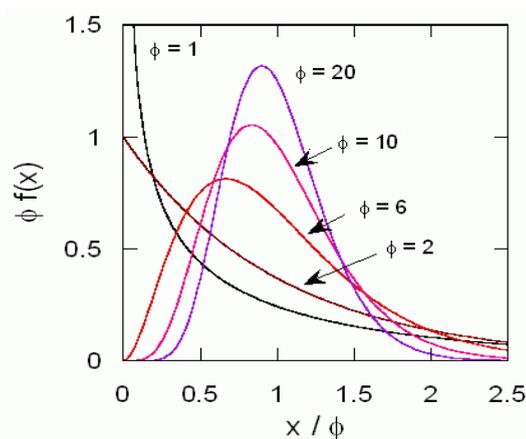


Fig. 5-6-3 Relationship between degrees of freedom and χ^2 distribution

5.7 特徴量の抽出

従来から波形の特徴を表す量として、周波数や振幅があり、平均振幅や最大振幅などがよく利用されてきた。また、周波数分析 (F.F.T) やウェーブレットなども利用されてきた。周波数分析は、波形の性質を周波数軸とエネルギー軸とで表現する技術である。ウェーブレットは、波形の性質を周波数軸とエネルギー軸のほかに、時間軸も含めて表現する技術である。周波数分析もウェーブレットも、波形の性質を表現するための優れた方法である [5.5]-[5.6]。しかし、両者とも対象の状態を正確に捉えたり、異常を予測したりするための十分な手法を有しているとはいきれない。たとえば、周波数分析は比較的長い時間の波形を対象とする処理なので、短時間に発生する波形の変化を捉えることは不得意である。また、両者とも得られた結果の評価を人間が見て判断することを前提としている。すなわち、特徴化の結果として得られるものは2次元あるいは3次元のグラフであり、それ以降の判断は人間に委ねることが多い [5.19]-[5.20]。

本事例では、波形パターンの性質をより正確に数値表現して、波形の形状情報から特徴量を抽出するパターン認識 MTS 法を適用し、モーターファンからの放射音波形から変化量と存在量を抽出して波形の特徴化を行った。

特徴抽出における変化量 (微分特性) と存在量 (積分特性) の概念について、Fig. 5-7-1 に示す。まず、時刻領域の波形に一定間隔で時間軸に平行線 (標本線) を引き、特徴量を算出するための時間軸上の区間 (抽出幅) を設定する。次に、抽出幅の区間内で標本線と交差する回数を変化量とし、標本線の上の範囲にある値の合計を存在量として求める。この変化量と存在量の算出を波形データの全区間で実施する事で、波形全体の特徴化を行なう事ができ、これを波形解析と呼ぶ [5.28] [5.35]。

変化量は、信号処理などの分野で利用されてきた“ゼロクロス”の考えを発展させたものといえる。“ゼロクロス”とは、Fig. 5-7-1 に示すように波形が標本線 (破線) と交差する箇所 (黒塗り●印) のことであり、交差箇所数は周波数とほぼ同等の意味をもつ。変化量はこのゼロクロスの考えを波形の振幅方向に広げて定義したものであり、ある振幅における振動の性質をもつ。振幅方向全体に標本線を定義することで、波形全体の振動の性質を表現することができる。また、存在量は、波形の形状の相違を捉える特徴量である。変化量と存在量は、標本線の数に比例して、その数が多くなる。しかし、MTS 法では多くの変数を短時間で処理することが可能であり、処理時間をかけずに、有効な結果を得る可能性が高くなる [5.3] [5.7]-[5.12]。

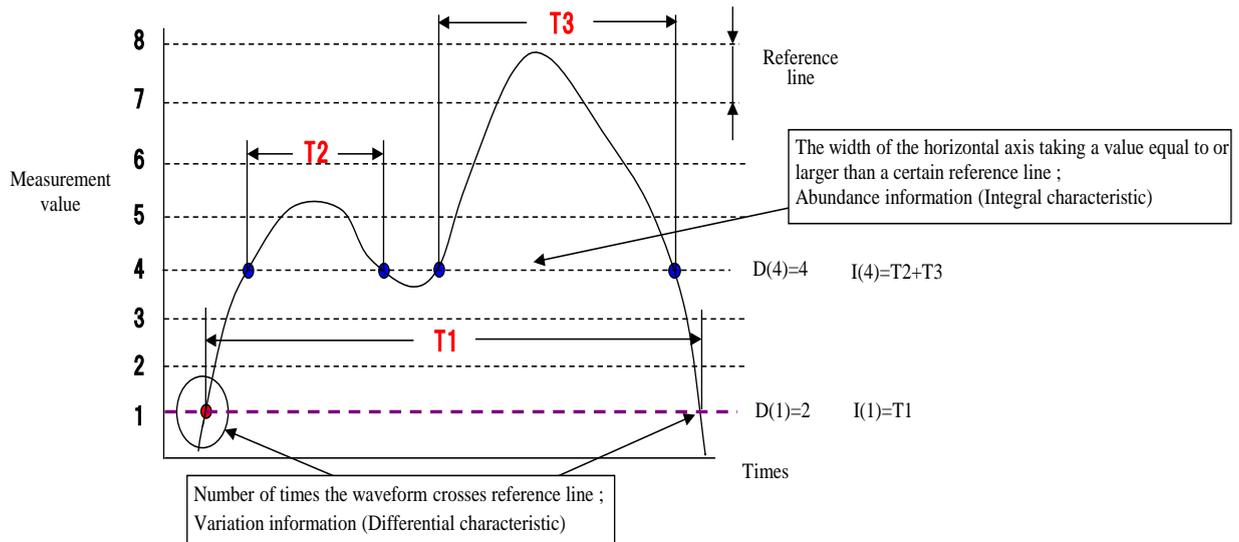


Fig. 5-7-1 Variation and abundance

5.8 放射音波形の測定

5.8.1 供試ファンの騒音レベル

Fig. 5-8-1 に示すように、ファンモータは一般に両方向に回転するため、ファンの羽根は半径方向に向かう直線羽根（ラジアルファン）を用いる。この直線羽根は、冷却効率が低く、しかも騒音は大きい。騒音レベルは、(5.16) 式からおよその値が求められる。ただし、騒音の評価位置はモータの軸中心高さで、距離 1m の場合である。

騒音レベル; A

$$A[db] = 70\log D + 50\log N + k \quad (5.16)$$

ここで、D : 羽根の外径(m), N : 毎秒の回転数, k : 定数で 32~36

この式から、騒音レベルを下げるにはファンの外径 D を小さくすることが重要である。しかし、風量と風圧も低下するので、これらと騒音のバランスが設計時には重要となる。すなわち、(5.17)式の関係になる。

$$\text{風量} = \pi\phi UDB \quad (5.17)$$

ただし、 ϕ : 流量係数(0.15~0.25), U : 羽根の外周速, B : 羽根の外周部の幅
風量は D の 2 乗で減少するので注意を要する [5.4] [5.44]。

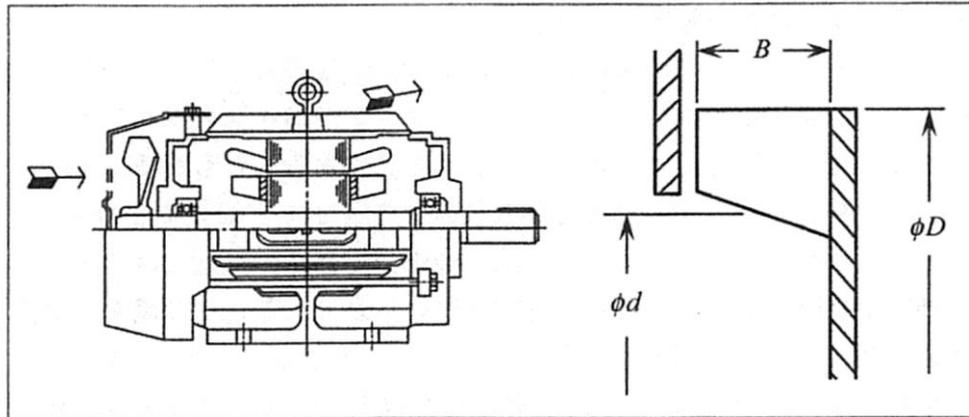


Fig. 5-8-1 Fan shape

5.8.2 供試ファン

本研究では、2種類の小型ファンモータを使用した。Fig. 5-8-2 (& Table 5-8-1) に示すサンプル品は、正常品を5個 (#9701~#9705) 用意した。Fig. 5-8-3 (& Table 5-8-2) に示すサンプル品は、正常品を10個 (fan1~fan10) , 異常品が5個 (fan#1~fan#5) である。異常品は面ブレを起こしており、それぞれの変位は、fan#1が $14\mu\text{m}$ 、fan#2が $25\mu\text{m}$ 、fan#3が $50\mu\text{m}$ 、fan#4が $70\mu\text{m}$ 、fan#5が $90\mu\text{m}$ である。

面ブレとは、ある一つの軸を中心に回転する端面が、回転中にこの軸に直角な一平面から外れたときのその大きさのことである。



Fig. 5-8-2 Test fan

Table 5-8-1 Specification of fan

Fan flame size	92.5×92× 25.4[mm]
Blade number	5
Rated Voltage	DC12V
Rotational speed	3400[rpm]



Fig. 5-8-3 Test fan

Table 5-8-2 Specification of fan

Fan flame size	42×42 ×10[mm]
Blade number	5
Rated Voltage	DC24V
Rotational speed	10000[rpm]

5.8.3 放射音測定システム

小型ファンモータの音の測定は、静かな室内で行った。録音の概略図を Fig. 5-8-4 に示す。集音は 1/2 インチコンデンサマイクロフォンにより、ファン吸い込み側の回転面から回転軸中心上 30mm としている。これは、検査員が官能検査を行う際の耳とファンとの距離を参考にしている。ファンの録音は 100 秒間行った。マイクロフォンからの信号は、A/D 変換器 DS-2100 を介して PC に保存され、サンプリング周波数は 51.2[kHz]とした。

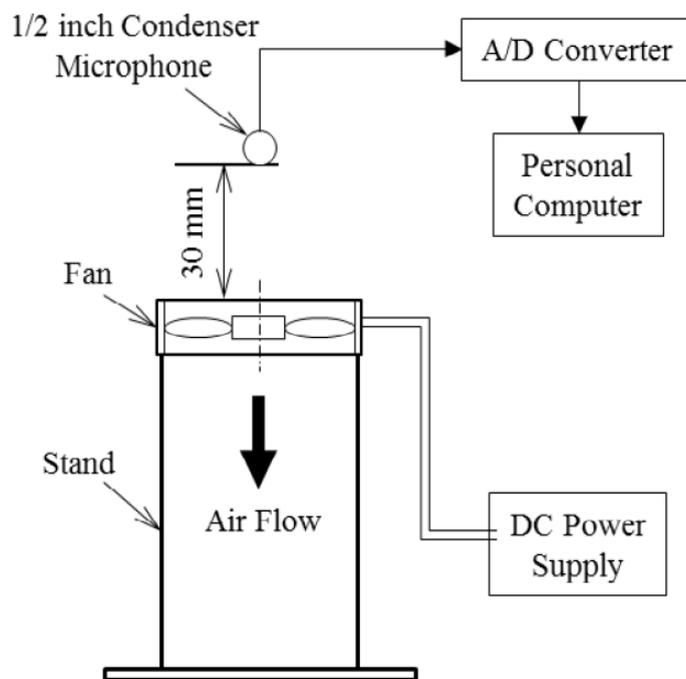


Fig. 5-8-4 Recording system

Fig. 5-8-5 にファンの放射音を測定して得られた波形データを示す。ファンの放射音の測定は、サンプリング周波数 51.2[kHz]より「5120000 サンプル=100 秒間」となる。

しかし、短い時間間隔の挙動変化を見ることで、より精度の高い解析ができると考えられる。そのため、データ収集間隔が最短である「0.1 秒間=5120 サンプル」の波形データを使用して波形解析を行った。

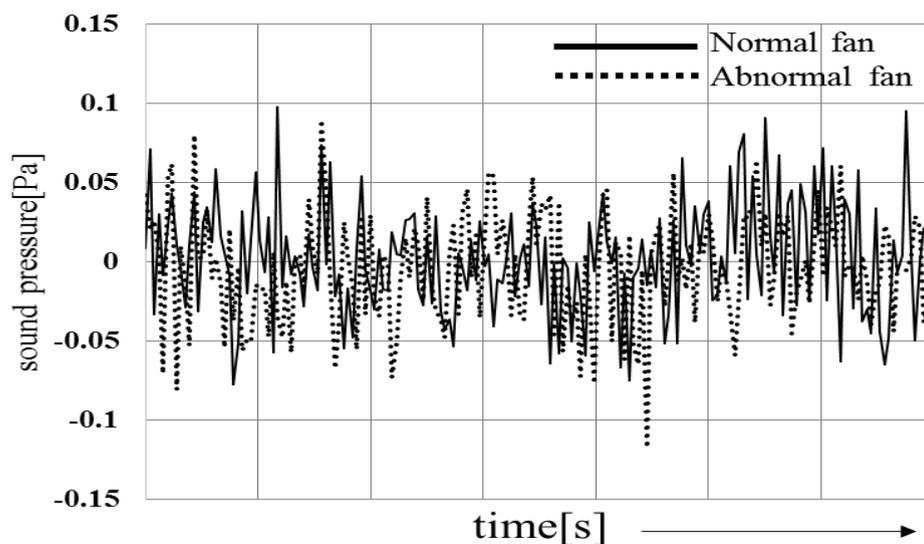


Fig. 5-8-5 Waveform data

5.9 放射音波形データの解析結果

5.9.1 正常品の解析結果

まず、Fig. 5-8-2 のファンにおいて波形解析し、特徴量を抽出した。解析領域は時間軸の分割間隔（抽出幅）が 20(s)、標本線 10(本)に設定した。1つの波形から抽出幅ごとに変化量と存在量を算出して、変数の数は 20 個となる。次にこれらを考慮し、変数の 3 倍のサンプル数となるように、正常品 5 個(#9701~#9705)から任意に 3 波形を選定し単位空間を作成した。最後に、単位空間に属さない正常品に対しても波形解析を行い、MD 値を算出した。この MD 値がしきい値以上の場合、異常と判別される。

Fig. 5-9-1 にその解析結果を示す。グラフより、しきい値以上の MD 値が確認できることから異常と判別される。しかし、正常品が対象であるため適切な解析が行えていないことが分かる。これは、特徴量の中に判別に無効な変数が含まれていることが推定される。よって、どの項目の有効性が高いのか評価する必要がある。

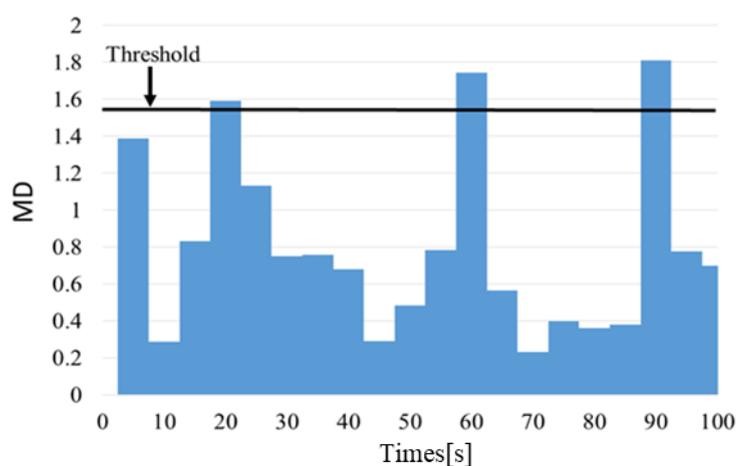


Fig. 5-9-1 MD calculation results of normal products

Fig. 5-9-2 は、対象データに対する有効性解析の結果である。横軸が標本線の領域（特徴量の変数）、縦軸が SN 比を示しており、SN 比が正に高い領域ほど項目選択に対して有効であることを意味する（SN 比が負の標本線 1～3、9～10 の領域には無効な変数が多く、結果として MD 値を大きくしている要因であると推定）。そこで、SN 比が正である標本線の領域について再度 MD 値の算出結果を Fig. 5-9-3 に示す。グラフ上では、MD 値が閾値以下となり正常と判別され、有効な特徴量が抽出されたと判断できる。

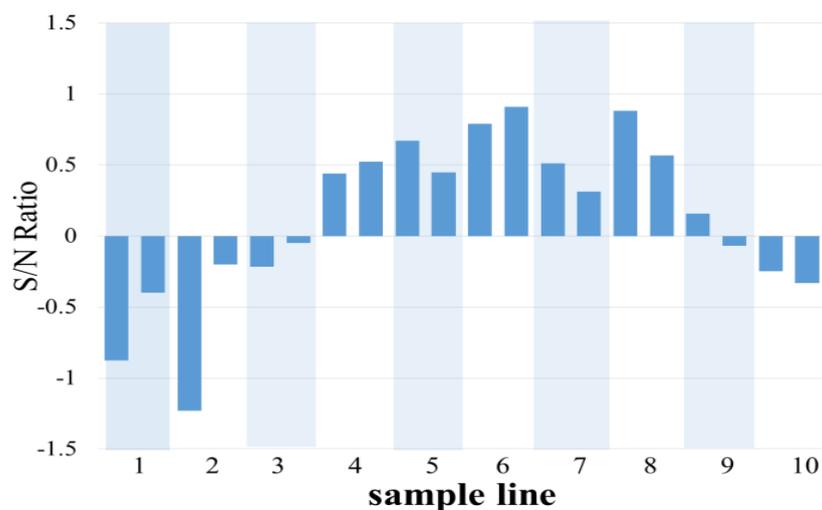


Fig. 5-9-2 Effectiveness analysis results

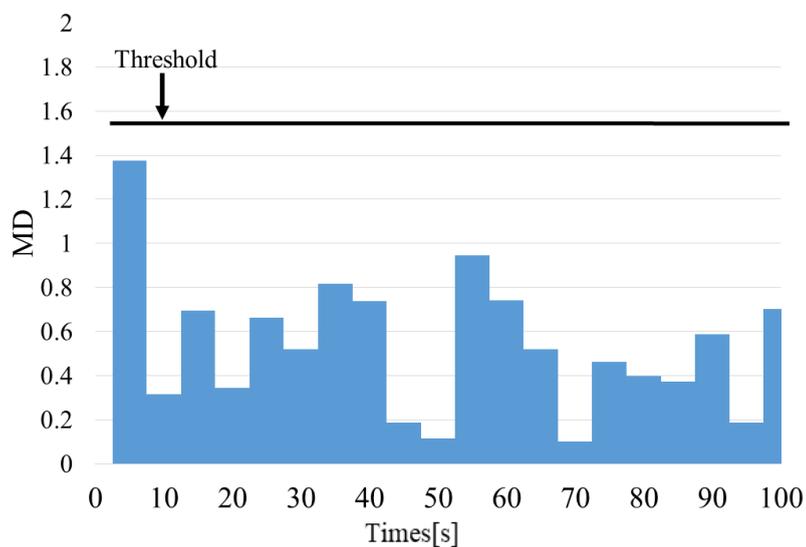


Fig. 5-9-3 MD calculation results after analysis

5.9.2 異常品の解析結果

次に、Fig. 5-8-3 のファンにおいて波形解析し特徴量を抽出した。設定値は、抽出幅 20、標本線 30 であり、変数の数は 60 個である。単位空間は、変数の 3 倍のサンプル数となるように正常品 10 個 (fan1~fan10) から任意に 9 波形を選定し作成した。そして、異常品 (#fan1~#fan5) に対して、波形解析を実施した。

Fig. 5-9-4 に、単位空間に属さない正常品と異常品の MD 値を示す。結果から、全ての異常品に対しては閾値以上の MD 値を示しており、異常と判別された。しかし、正常品の中には閾値をこえて異常品と判別されるアイテムも確認された。

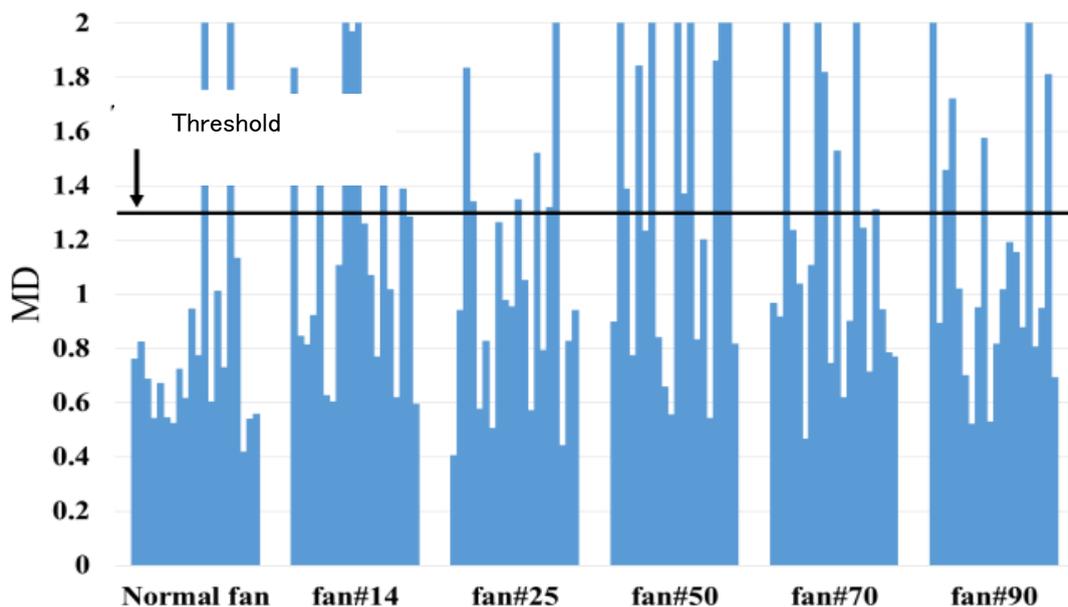


Fig. 5-9-4 MD calculation results of each sample fan

Fig. 5-9-5 は、異常品 (#fan1) の波形についての有効性解析結果である。図より、SN 比が正の値を示すのは変数の中央部分で多く、両端ではすべて負の値となっている。他の異常品の有効性解析でも同様の傾向を示した。負の値をとる変数は、標本線の変化量と存在量であり波形中央部の変数を特徴量とすることで、精度の良い異常判別が可能であることを示している。

Fig. 5-9-6 は、全ての異常品を有効性解析した結果から SN 比が正の値である変数を特徴量として、MD 値を算出した結果を示す。図より、正常品は閾値以下、異常品は閾値以上の MD 値となり、適切な判別結果であることがわかる。

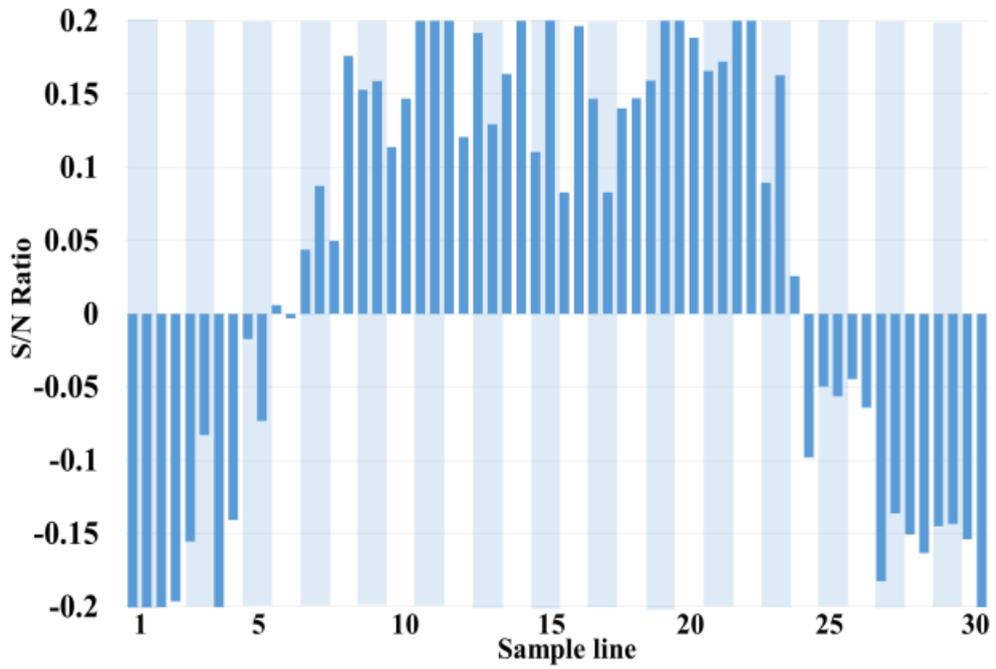


Fig. 5-9-5 Effectiveness analysis results

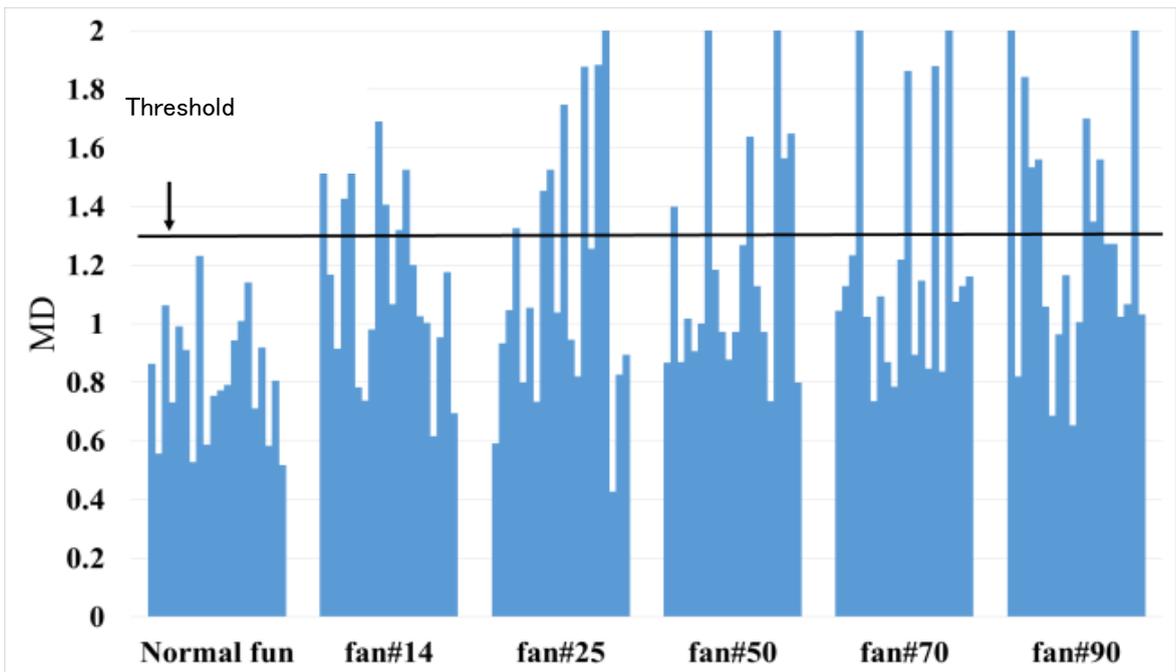


Fig. 5-9-6 MD calculation results of each sample fan

5.10 振動波形の測定

モーターファンを官能検査する際、検査員はファンフレームの側面の二ヶ所を保持し、手首を回しながら耳元近くで聴覚と触覚により診断を行っている。前節では、聴覚で判別する“放射音”の波形データをMTS法の新たに提案した解析法の有効性について検証した。本節では、触覚で判別する“振動”の波形データの解析法の有効性と、検査員が行うハンドリングを模した簡易型回転揺動装置を考案し、モーターファン振動の自動化検査方式の実現性について検証した[5.17]。

5.10.1 振動波形測定システムの概要

Fig. 5-10-1 と Fig. 5-10-2 に回転揺動装置を示す。振動の測定条件として、サーボモータの回転数を 3rpm, ファン回転数を 3400rpm, 計測時間を 40 秒に設定した。また、ファンの揺動角 θ は 15°, 30°, 45°の 3 条件とし、軸方向と半径方向で測定した。



Fig. 5-10-1 Overview of automatic rotary oscillating device

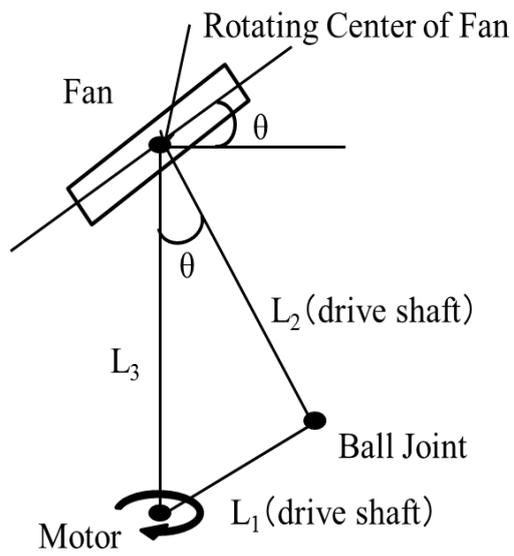


Fig. 5-10-2 Schematic of automatic rotary oscillating device

5.10.2 振動波形データ

振動レベルの波形データはレベルレコーダを使用して測定したが、Fig. 5-8-3の供試ファンは、振動レベルが小さく、十分な波形データを得ることが出来なかった。したがって、本研究ではFig. 5-8-2の供試ファンを採用し、それぞれ振動の大きさが異なるサンプルの呼び番号を振動加速度レベルが大きくなる順(#9701, #9702, #9703, #9704, #9705)に付した。Fig. 5-10-3, 5-10-4は、ファンの揺動角を $\theta = 15^\circ$ に設定し、回転揺動装置で軸方向と半径方向の振動波形データである。

Fig. 5-10-3の軸方向における振動波形では、呼び番号順に振動加速度レベルが大きくなることが確認できる。一方、半径方向の振動波形は、#9705以外、波形の挙動が微少なために、振動レベルの大きさを波形から判断することが難しい。さらには、異なる揺動角の条件下でも同様の傾向が見られた。したがって、本研究ではファンの揺動角 15° , 30° , 45° の3条件の軸方向の振動波形について放射音の解析手順と同様に、波形解析を行った。

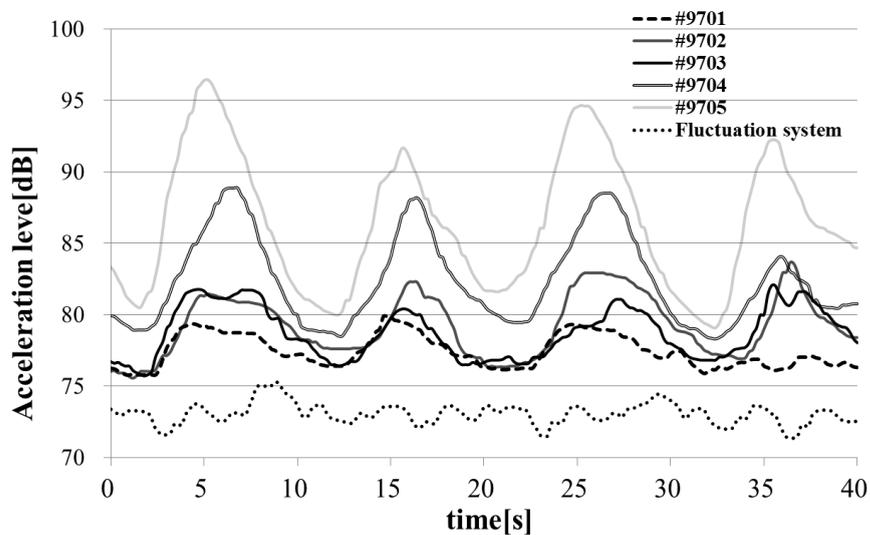


Fig. 5-10-3 Acceleration level of axial direction with angle of oscillation 15°

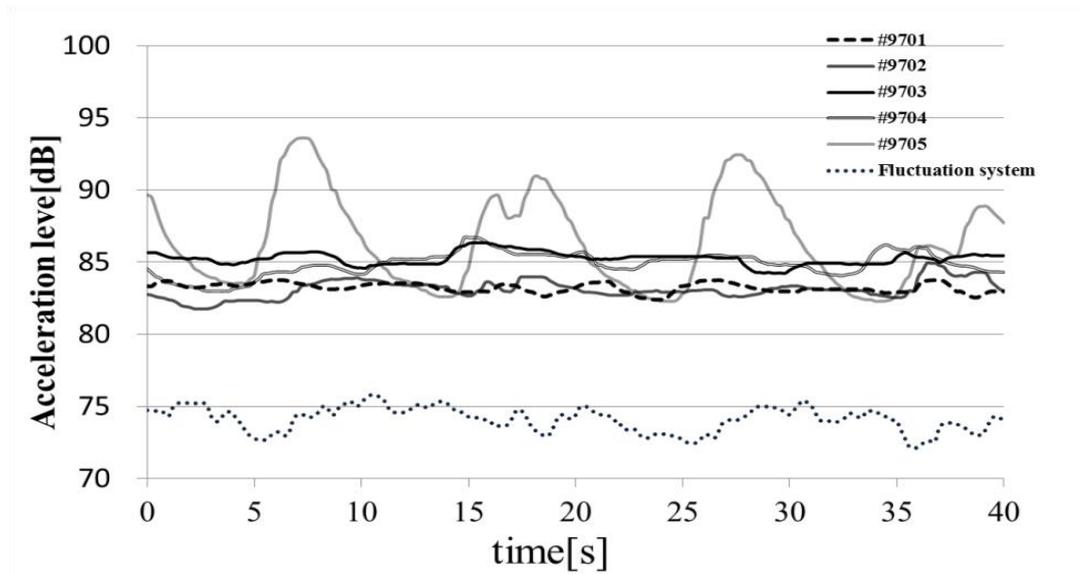


Fig. 5-10-4 Acceleration level of radial direction with angle of oscillation 15°

5.10.3 振動波形の解析結果

Fig. 5-8-2 の供試ファンの振動波形における波形解析の設定値は抽出幅 20，標本線 10 とした。変数の数は 20 個となるためその 3 倍のサンプル数となるように正常品 5 個 (#9701~#9705)から任意に 3 波形を選定し単位空間を作成した。そして，単位空間に属さない正常品に対しても波形解析を行い，MD 値を算出した。

本研究では，ファンの揺動角 15°，30°，45°の 3 条件の軸方向の振動波形について解析を行い，Fig. 5-10-5 にファンの揺動角ごとに算出された MD 値の結果を示す。揺動角 15°，30°の場合，MD 値が閾値以上をとることから異常と判別された。揺動角が 45°においても，MD 値が閾値より大きくなる箇所はあるが 3 つの条件の中で最も良い結果を得た。Fig. 5-10-6 に各揺動角について有効性解析を行った結果を示す。揺動角 15°，30°の解析結果では SN 比が負となる変数が多いことが MD 値を大きくしている要因であると考えられる。一方，揺動角 45°では SN 比が負となる変数の数が少ないため，判別に有効な特徴量を抽出できていると判断できる。

Fig. 5-10-7 は，揺動角 45°での SN 比が正をとった変数を特徴量とし MD 値を算出した結果である。グラフの結果から，MD 値が閾値以下であるため適切な判別結果が得られた。

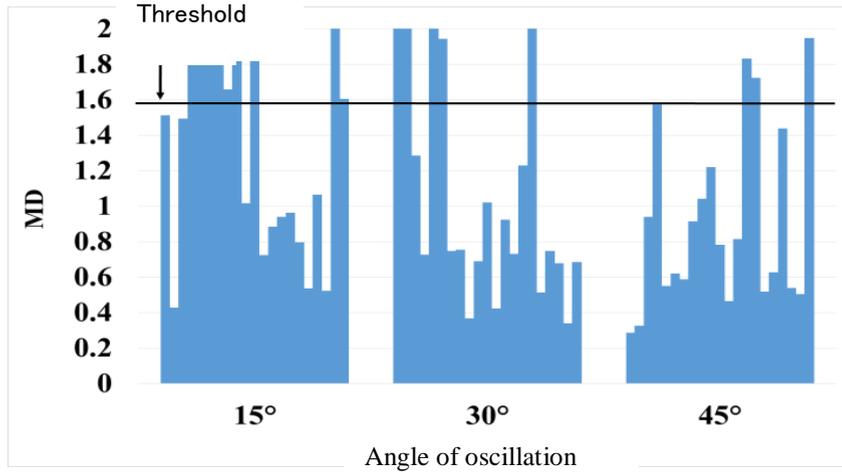


Fig. 5-10-5 MD calculation results of each angle of oscillation

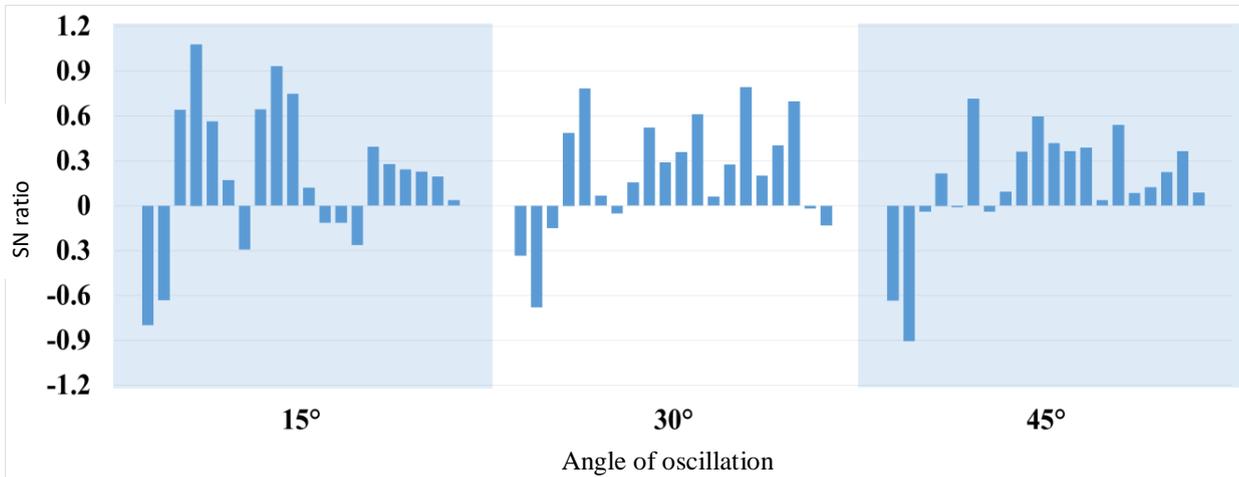


Fig. 5-10-6 Effectiveness analysis results

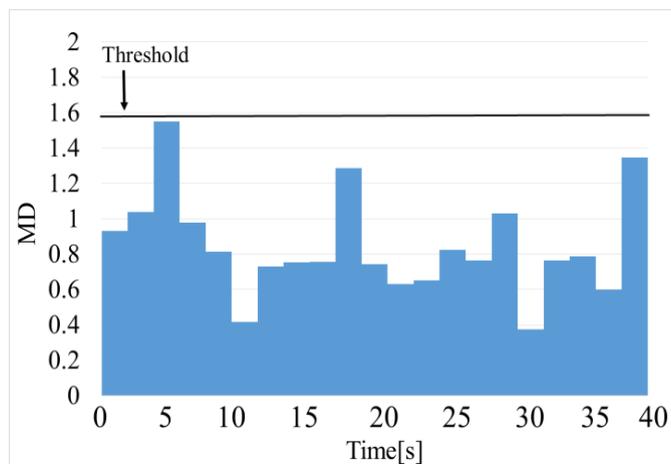


Fig. 5-10-7 MD calculation results of angle of oscillation 45°

5.11 研究成果と今後の課題

本研究では、モーターファンの音響と振動の測定結果を“パターン認識 MTS 法”による波形の形状情報から特徴量を抽出する方法を適用した。そして、得られた波形情報の特徴量を SN 比と MD 値の融合特性として評価することを提案し、判別の検出精度の向上を目的とした解析研究に取り組んだ。最終的には、モーターファンの放射音と振動の波形解析において、“融合評価特性“と”閾値設定法“の適用により、検出に有効な特徴量を抽出することで、正常品と異常品の適切な判別結果が得られた。

一般的なパターン認識手法は、想定されている異常パターンのデータが数多く収集できれば、異常パターンの分類も精度良くできると言われている [5.18]。しかしながら、現実には、正常データは収集できるものの、異常データの収集は、設備の規模が複雑かつ大きくなるほど困難となる。MTS 法は、基準とする正常データ群との差異で測定データを評価するため、学習用のデータ収集は正常データのみで良く、この方式は、未知なる異常パターンにも対応可能である [5.1] [5.25] [5.42]。

波形情報からの特徴化解析法として、従来から、周波数分析（スペクトル分析、高速フーリエ変換分析など）やウェーブレットが採用されている。これらの解析法と MTS 法における特徴量である変化量と存在量との相違について、以下にまとめる [5.2]。

1. 周波数分析やウェーブレットにより、波形の性質や同質性がグラフや図によって表示されるので、人間にとっては見てわかる表現である。
2. 変化量・存在量は、波形特徴を表現する数値情報であるため、人間がその情報を見ただけでは、波形の性質を把握することは困難である。しかし、直接的にコンピュータに与えることができる情報なので、パターン認識にそのまま利用することができる。
3. 周波数分析では、十分に長い波形の平均的な性質を示しているため、短時間に起こる変化を捉えることが難しい。一方、変化量・存在量による特徴抽出は、一定の時間幅ごとに特徴量を抽出するので、時間幅単位でパターンの相違を検出することができる。

研究成果として、MTS法による波形の形状情報からの特徴量の抽出を適用する解析法が、一般的な特徴化解析法（周波数分析法など）に比べて判別分析精度の向上に関して、有効性が高いことが確認できた。さらには、検査工程を官能検査からMTS法の導入による自動化への実践的なアプローチの実現可能であることが明らかになったことにより、「判別分析法の精度向上（高品質）不良率30%削減」と「検査工程の自動化（高生産性）可動率20%向上」および「検査員の省人化（低コスト化）製造原価30%削減」を同時に達成できる目途がたった。また、本研究での振動波形の“融合評価特性”による解析結果から、揺動角が大きくなれば、波形の振動幅のばらつきが小さくなる傾向になることがわかった。

また、「MTS法」を適用した小形風力発電システムの高効率稼動技術の研究報告[5.51]に関しても本論文で提案した“融合評価特性“と”閾値設定法“の適用により同様の研究成果が得られた。

今後の研究課題としては、モーターファンの振動波形からの正常・異常の自動化による判別分析法において、揺動角と振動幅の物理的な位置の相関関係に着目し、MTS法の適用により、さらなる具体的な要因の解析に取り組む計画である。

参考文献

- [5.1] 立林和夫, 手島昌一, 長谷川良子: 「入門 MT システム」, 日科技連, (2012).
- [5.2] 鈴木真人: 「MT システム解析法」, 日刊工業新聞社, (2012).
- [5.3] 涌井良幸, 涌井貞美: 「多変量解析がわかる」, 技術評論社, (2014).
- [5.4] 野田伸一: 「モータの騒音・振動と対策設計法」, 科学情報出版株式会社, (2014).
- [5.5] 田口玄一: 「品質工学講座 5 品質工学事例集 日本編一般」, 日本規格協会, (1992).
- [5.6] 矢野宏: 「品質工学計算法入門」, 日本規格協会, (2002).
- [5.7] 田口玄一, 矢野宏: 「品質工学応用講座 コンピュータによる情報設計の技術開発ーシミュレーションと MT システムー」, 日本規格協会, (2004).
- [5.8] 鈴木真人: 独習! 信号処理, 秀和システム, (2017).
- [5.9] 大久保豪人, 永田靖: MT システムにおける小標本データの解析方法, 日本経営工学会論文誌, Vol.66 No.1 pp.31-38, (2015).
- [5.10] 宮川雅己, 田中研太郎, 岩澤智之, 中西寛子: “マハラノビス・タグチ・システムにおける実際の誤判別率”, 品質工学会誌, Vol.37 No.1 pp.101-106, (2007).
- [5.11] 宮川雅己, 永田靖: “マハラノビス・タグチ・システムにおける多重共線性対策について”, 品質工学会誌, Vol.33 No.4 pp.77-85, (2003).
- [5.12] 大久保豪人, 永田靖: “タグチの RT 法における同一次元でない連続量データへの適用方法”, 品質工学会誌, Vol.42 No.2 pp.86-102, (2012).
- [5.13] 田口玄一, 兼高達也: 「MT システムにおける技術開発」, 日本規格協会, (2002).
- [5.14] 田村希志臣: “よくわかる MT システム” , 日本規格協会, pp.50-66, (2009).
- [5.15] 田口玄一: 品質工学の数理, 日本規格協会, (1999).
- [5.16] 奥村進, 上野将徳: マハラノビス距離の統計的性質を考慮した MT システム, 2007 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, L33-1071-1072, (2007).
- [5.17] Eiji Toma: Analysis of motor fan radiated sound and vibration waveform by automatic pattern recognition technique using “Mahalanobis distance”, Journal of Industrial Engineering International, vol.15, issue 1, pp81-92, (2019).
- [5.18] 田口玄一: MT システムにおける技術開発, 日本規格協会, pp.83-92, (2002).
- [5.19] 菊池富男, 佐々木市郎: MT システムによる不良流出撲滅の取組み, 品質工学会誌, Vol.14 No.1 pp.77-82, (2006).

- [5.20] 兼高達也（編）：MTシステムにおける技術開発，日本規格協会，pp.210-281，(2002).
- [5.21] 田口玄一監修：品質工学便覧，日刊工業新聞社，pp.128-177，(2007).
- [5.22] 田口玄一編：最適化設計のための評価技術，日本規格協会，pp.198-199，(2000).
- [5.23] 長谷川良子：マハラノビス距離を用いた健康診断と欠測値対策パート1 欠測値がない場合，品質工学会誌，Vol.5 No.5 pp.46-54，(1997).
- [5.24] 西岡健人，是澤宏之，檜原弘之，鈴木裕：MTシステムによる切削加工時の加工状態の評価－MTシステムを用いたびびりの判別－，2013年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，K46-721-722，(2013).
- [5.25] 高田圭：MTシステムによる水晶振動子の外観不良判定，品質工学会誌，Vol.9 No.2 pp.56-62，(2001).
- [5.26] 長谷川良子：「マハラノビス・タグチ(MT)システムのはなし」，日科技連，(2004).
- [5.27] 中津川雅史，大内東：MTS アルゴリズムにおけるしきい値設定法に関する考察，電子情報通信学会論文誌，J84-A(4)，pp.519-527，(2001).
- [5.28] 棚橋誠，松田眞一：MT法と各距離における分析法の比較，南山大学紀要『アカデミア』情報理工編，Vol.7，pp.21-32，(2007).
- [5.29] Penny, Kay I：Appropriate Critical Values when Testing for a Single Multivariate Outlier by Using the Mahalanobis Distance, Appl. Statist., Vol.45 No.1 pp.73-81，(1996).
- [5.30] 鴨下隆志：おはなしMTシステム（予測・推測の可能性を広げる品質工学手法），日本規格協会，(2005).
- [5.31] 下垣内誠：ATユニット異音評価方法の開発，マツダ技報，No.23，pp.142-147，(2005).
- [5.32] 手島昌一，奥野拓，青野文朗，佐藤功一，久保洋：マハラノビス距離を適用した切削以上監視に関する研究，精密工学会誌，Vol.65，No.9，pp.1325-1329，(1999).
- [5.33] 鴨下隆志，奥村健一，高橋和仁，増村正男，矢野宏：文字認識におけるマハラノビスの距離による判定の研究，品質工学会誌，Vol.6，No.4，pp.39-45，(1998).
- [5.34] 中迫昇，小倉久直：独立成分分析の基礎と音響信号処理，システム/制御/情報，Vol.46，No.7，pp.400-408，(2002).
- [5.35] Rajesh Jugulum, Leslie Monplaisir：Comparison between Mahalanobis Taguchi System and Artificial Neural Networks, Journal of Quality Engineering, Vol.10, No.1, pp.60-73，(2002).

- [5.36] 中津川雅史, 大内東: MTS アルゴリズムにおける項目選択峰に関する検討, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J84-A, No.4, pp.434-441, (2002).
- [5.37] 中島尚登, 高田圭, 矢野宏, 柴本由香, 高木一郎, 山内真義, 戸田剛太郎: 健康診断データを用いた MTS 法による予測の研究—今年健康から来年健康を予測する方法—, 品質工学会誌, Vol.7, No.4, pp.49-57, (1999).
- [5.38] 鴨下隆志, 田端和人, 岡野晴敏, 高橋和仁, 矢野宏: マハラノビスの距離による多次元情報システムの最適化, 品質工学会誌, Vol.4, No.3, pp.54-68, (1996).
- [5.39] 岡田幸弘, 河瀬順洋: 品質工学と多変量解析法による磁石埋め込み形モータの最適設計, 電気学会論文誌 D, Vol.123, No.12, pp.1516-1522, (2003).
- [5.40] 手島昌一, 坂東友則, 金丹: マハラノビス・タグチ・システム法を適用した外観検査技術の研究, 品質工学会誌, Vol.5, No.5, pp.38-44, (1997).
- [5.41] 田口玄一: パターン認識のための品質工学(3), 品質工学会誌, Vol.3, No.4, pp.2-5, (1995).
- [5.42] 田口玄一: 音声のパターン認識, 品質工学会誌, Vol.3, No.5, pp.3-7, (1995).
- [5.43] 救仁郷誠: マハラノビスの距離入門—MTS 法を理解するために—, 品質工学会誌, Vol.9, No.1, (2001).
- [5.44] 有光哲彦, 武田晃, 戸井武司: 製品組み立てばらつきを考慮したパワーシート稼働音の音質安定化設計, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.836, (2016).
- [5.45] 大塚祐一: オンライン品質工学における検査設計—出荷先が社内の検査設計の提案—, 品質工学会誌, Vol.17, No.5, pp.34-40, (2009).
- [5.46] 日座和典: 品質工学の立場から見た官能評価実験の課題, 品質工学会誌, Vol.13, No.6, pp.88-93, (2005).
- [5.47] 日座和典: 官能評価におけるパネルの選択, 第 17 回官能検査シンポジウム, 日科技連, (1987.9).
- [5.48] 田口玄一: 官能による識別力の評価, 標準化と品質管理, Vol.56, pp.4-6, (2003).
- [5.49] 鴨下隆志: 官能評価と統計学, 人間工学会誌, Vol.22, No.3, pp.121-125, (1986).
- [5.50] 松田眞一: 2重非心 F 分布のパーセント点近似法に関する考察, 南山大学紀要『アカデミア』理工学編 第 17 号, 1-7, (2017 年 3 月)
- [5.51] Eiji Toma, Hiroshi Tanaka, Kazushige Kikuta: Research on High Efficiency and Optimization of Compact Wind Power Generation System applying "Maharanobis-Taguchi-System", Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers, Vol.7, No.1, pp.1-8, (2019)

第 6 章 研究総括と展望

6.1 研究の成果と総括

あらゆる工業技術産業界において、特に生産加工技術分野や品質検査（保証）分野では、品質は最も重要な概念となる。しかし、品質そのものを正面から、しかも、マネジリアルな対象として捉えることは、非常に困難である。いままで多くの実証研究では、生産管理またはマーケティングにおける品質概念を用いて、様々な手法を適用してきた。

しかし、工業技術分野におけるシステム・製品の品質機能の本質を明らかにするためには、個別の対象技術の最適化に関して“品質の機能性を明確に定義”することは、学術的にも意義があるものとする。本論文では、個別の対象技術に対して、新たな理想機能を設定し、品質機能の明確な定義によりシステムを最適化する“品質工学における機能性評価法”の適用を提案し、その有効性について、工業技術分野の主要な柱である生産加工技術と品質検査（保証）に関する個別の研究事例を取り上げて検証した。本研究での成果と総括は、以下の通りである。

第 1 章では、品質工学の概要と基本的な品質工学手法適用のプロセスを解説後、生産加工技術分野におけるパラメータ設計法への新たな理想機能の設定による“機能性評価法”の適用と、品質検査分野におけるパターン認識 MTS 法への新たに追加した解析手段である“融合評価特性“と”閾値設定法“の適用を提案した。また、個別の対象技術におけるシステムの最適化に関して、提案した方法が研究事例で適用できることを検証した。

第 2 章から第 4 章では、個別の対象技術におけるシステムの最適化に対する品質工学における新たな理想機能を設定した“機能性評価法（静スカラー特性と動ベクトル特性）”の適用を提案し、生産工程に馴染む品質工学手法の展開と高度化には、有効性の高いことが研究事例で立証できた。

特に第 4 章では、高周波誘導加熱による焼嵌め工法を考案し、誘導加熱エネルギーの直線性を新たな理想機能として設定した「機能性評価（動ベクトル特性）」の適用による検証結果では、確認実験により焼嵌め工法が実践的に適用可能であり従来工法よりも生産性と低コスト化に優位性と品質確保が技術的に保障できることが明らかになった。

第5章では、モーターファン部品検査工程の最適化に関する「パターン認識 MTS 法」における“融合評価特性”と“閾値設定法”の適用による新たな判別検査法を提案した。

本事例では、「パターン認識 MTS 法」を適用した冷却用モーターファンの判別分析法の有効性について検証した。最終的には、MTS 法による解析法が、従来の周波数解析法に比べて、判別分析（正常/異常の）精度の向上に関する有効性が高いことと、検査工程自動化の実現可能であることが立証できた。

本論文では、“品質工学における機能性評価法”の適用による生産加工技術分野と品質検査分野に関する研究事例を取り上げて、その有効性について論じた。

本研究を通して、これからの品質工学は、研究開発における技略のひとつとして位置づけられ、個別の品質特性の評価よりも目的機能を包含する基本機能で評価することが不可欠であり、目的機能を理想機能におき、理想機能と実際の特徴との違いに着目した機能性を評価することは、「品質の安定化」に寄与し、「生産性の向上」と「低コスト化」に極めて有効であると考えられる。

6.2 品質工学の展望

今後の展望として、本論文で提案した“品質工学における機能性評価法”の適用は、開発の効率化に非常に有効であり、かつ対象となるシステムの機能性向上とロバスト性を与え、システム自体の良否を早期に効率よく評価できる手法であり、この手法を用いることにより、設計品質と適合品質の基礎となっているロバストな製品設計を可能にし、「総合製品品質」の向上とフロントローディングに寄与することが大いに期待できる。

また、第5章の研究で採用した判別と予測のための品質工学手法である「パターン認識 MTS 法」の適用に関する今後の展望について以下に述べる。

我が国においては、労働人口や専門技術者の減少という現実がすでに深刻化している状況の中で、高度な判定を実行し、人間への判断支援情報を速やかに提供する手段として、実用価値の高い“パターン認識技術”の開発は、重要課題の1つとなっている。その中でも、“パターン認識 MTS 法”は新しいパターン認識の方法として、あらゆる工業技術産業界の品質検査分野において、今後の発展と適用ニーズの拡大化が見込まれる。

謝 辞

本研究と本博士論文の作成において、学位取得の志と多大なご支援を賜りました苦小牧工業高等専門学校 元校長 黒川 一哉先生、ならびに終始熱心な御指導と御教授を賜りました北海道科学大学工学部 機械工学科 教授 見山 克己先生に心から厚く御礼申し上げます。本論文の執筆にあたり、著者が自動車部品製造企業である(株)ダイナックス生産技術本部に所属していたころから、独立行政法人国立高専機構本部 鶴岡工業高等専門学校及び苦小牧工業高等専門学校 創造工学科の教官赴任に至るまでの、品質工学手法の実践活用に関する研究を進めるにあたり、多くの方々に御協力・御支援・御助言をいただきました。

第2章の研究は、(株)ダイナックスとの委託研究で実施しました。本研究を推進する中で、アングルトライ(株) 代表取締役社長 手島昌一博士には、品質工学による解析手法の論理的展開や検証・評価法について、多大な御指導と御討論をいただき心より感謝の意を表します。

第3章の研究に関しては、樹脂の成形加工製造会社であるスズモト株式会社殿との共同研究の機会を得ました。スズモト株式会社 百瀬 浩 代表取締役社長、他、多くの方々には、樹脂成形加工の最適化による品質安定化と生産性向上の実現を共に進めていただきました。研究を推進する中で、実機による試作品の製作や静破壊試験による部品強度の解析において熱心な討論をしていただいた。議論を通して貴重な御意見をいただき、本研究を大きく前進する力添えとなりましたことに深く感謝の意を表します。

第4章及び第5章の研究では、汎用モータ部品の製造会社である(株)オリエンタルモータとの共同研究で実施しました。本研究を推進する中で、(株)オリエンタルモータ 製造技術部 金子 知博 課長、伊藤 裕 担当技術員には、モータの特性を考慮した製造プロセスの実地検証について、長年の実践経験と知識に基づき研究遂行上の有益かつ適切な御指導をいただきましたことに深く感謝の意を表します。また、研究を効率的に進めるためのデータ分析の自動処理化に御協力いただいた手島昌一博士には、データベース化から資料作成および解析作業に多大なるご指導をいただき深く感謝の意を表します。

最後に、本研究の遂行途上において多大な御指導、御鞭撻、御助力を賜った関係諸氏に深く御礼申し上げるとともに、品質工学の創始者である田口玄一氏が2012年6月2日にご逝去され、本稿の書面を拝借し謹んでご冥福を心よりお祈り申し上げます。