

修士論文概要書

Master's Thesis Summary

Date of submission: 01/dd/2024

専攻名（専門分野） Department	経営デザイン専攻	氏名 Name	柴田 理央 Rio Shibata	指 導 教 員 Advisor	棟近雅彦 下野僚子 印 Seal
研究指導名 Research guidance	品質マネジメント 研究	学籍番号 Student ID number	5223F010－1		
研究題目 Title	生産管理を目的とした多品種少量生産における工場の製造実態の把握 Understanding the actual manufacturing conditions of factories in high-mix, low-volume production for the purpose of production management				

1. 研究背景と研究目的

1.1. 研究背景

製造業では、大量生産から多品種少量生産へと生産方式を移行しつつある。これは、工場での段取り回数の増加や、製品の管理の複雑化を招き、工場の製造実態の把握をより困難にしている。そのため、工場の製造実態に基づいた製品ごとの製造原価や工場の生産計画を、企業が適切に設定できているのかは不明確である。このような現状から、工場の製造実態を適切に把握する重要性が高まっている。

印刷業では、顧客の受注に基づいて、多種多様な印刷物を製造する。案件によって、そのロットの大きさなど、製品の仕様は様々であり、製造に用いた材料の量や時間などの製造実績も大きく異なる。そのため、工場全体の製造実態を正確に把握することが困難であり、原価管理や生産計画などの改善活動につなげることが難しい。

こうした状況では、工場を適切に稼働しているかが不明確であり、収益性を低下させる要因となる可能性がある。より高い収益を確保するには、工場の製造実態を適切に把握し、製品ごとにかかる製造時間を見積もったうえで、それを生産計画や製造原価に反映させる必要がある。そのため、工場の製造実態を適切に把握する方法が必要である。

1.2. 研究目的

印刷物は、用途と色や柄といったデザインで仕様が多岐にわたるため、製品仕様ごとの製造時間などを正確に予測することは難しい。しかし、仕様が多岐にわたっても、似た仕様を持つ製品は多く存在すると考えられ、その製造実績は類似すると考えられる。そのため、製品ごとの製造実績を正確に予測することは難しいものの、仕様に基づいて製品をいくつかの種類に分類することで、工場の製造実態を適切に把握することにつながると考えられる。

本研究では、工場の製造実態を適切に把握するための手段として、工場の製造実績に基づいて、仕様の似ている製品をグルーピングする手法を提案することを目的とする。なお、印刷会社 C 社を事例とする。

2. 従来研究と研究方法

2.1. 従来研究

小堤[1]は、原価管理を目的に、工場の製造実態を把握する手段として、製造実績の違いに基づく多品種少量生産の製品の分類をした。分類には、製造に使用した材料の数量、製造時間、ロスなどのデータにクラスター分析を適用した。

しかし、製造数量と機械の稼働時間といった強い相関を持つ変数を考慮せずにクラスター分析を行った結果、クラスターは数量の影響を大きく受けることとなった。そのため、クラスターの数を増やしても、数量以外の要因によるクラスター間の違いを見出すことができなかった。

2.2. 研究方法

小堤の研究を踏まえ、本研究では、以下の 2 点を、製品を分類する上での要件と定めた。

- 1) グループ間で製造実績の差が大きく表れ、かつグループ内の差が小さいこと
- 2) どのような仕様が、どのように製造実績に差を与えるのかが明確であること

1)について、製品を分類する観点はさまざま考えられるが、数量や製造時間などの要因が、原価や製造時間に大きな影響を与えるため、これらの差からグループ間の違いを明確にすることが望ましい。しかし、相関の強い変数を用いてクラスター分析を行うと、分析結果がそれらの変数に大きく影響される可能性がある。そのため、この影響を緩和する手段として、主成分分析を用いてデータが持つ情報を要約することを検討する。

2)について、売価や生産計画が製造前に決定されることを考慮すると、新規案件であるかどうかや、どの得意先からの案件であるかといった製造前に把握可能な定性的な情報(以下、製品の仕様)で製品が分類されることが、分類結果を実務で用いる際に望ましいと考えられる。そのため、まず製造実績の中で大きく差が出る要因を特定し、それがどのような製品の仕様によって生じるのかを明確にする。

研究方法は、以下のとおりである。まず、C 社の製品の仕様および製造実績を把握するため、これらを示すデータを、C 社が記録している製造実績データから調査する。次に、製品間の違いで大きな差が生じる製造実績項目を特定するために、主成分分析を行う。その後、製品を分類するためにクラスター分析を行う。最後に、グループ間の製造実績の違いを、製品の仕様の違いから明らかにする。

なお、C 社の製品の約 9 割が製品群 N であるため、対象を製品群 N に限定する。また、分析対象とする製造実績は、印刷工程で記録された 2237 件のデータである。

3. 製造実績データの調査

製品の分類には、製品を作る前に把握可能な製品の仕様を示す変数と、製品を作った後に把握可能な投入資源および生産高を示す変数が必要である。そのため、これらのデ

ータが記録された製造実績データを調査した。

まず、C社の製品における仕様を把握するため、製造実績データから製品の仕様を示す変数を調査した。その結果、品名、得意先、版区分、原反名の4つの変数が記録されていた。これらの変数の意味を表1に示す。なお、版とは、印刷に用いられる文字や模様が彫られた円筒を指す。原反は、印刷が施される紙やフィルムなどの材料を指す。

表 1.製品の仕様を示す変数

製品の仕様_変数	意味
品名	受注した製品の名前。色や柄、特別なインキや印刷以外の後加工が必要ななど、製品の名前以外の情報を含む。
得意先名	製品を発注した会社や取引先の名前。デザインの再現度など、顧客要求の違いを見る指標となる。
版区分	新版や改版といった版の名前。案件が新規かマイナーチェンジかなどを示す。
原反名	原反の名前。原反の材質、厚みや幅を示す。

次に、C社の製品においてどのような資源が投入され、何が生産されるのかを把握するため、投入資源および生産高を示す変数を調査した。その結果、投入資源としては、製造にかかった段取り時間と稼働時間、原反およびリード紙の投入数量、調色にかかった回数や色の数が記録されていた。一方、生産高としては、製品の製造数量およびロスm数が記録されており、合計で12個の変数が確認された。これらの変数の意味を表2に示す。なお、リード紙とは、インクの色合わせに用いられる原反よりも原価の安い試し刷りの用紙を指す。また、投入数量は1m単位、製造時間は5分単位で記録されていた。

表 2.投入資源・生産高を示す変数

投入資源・生産高を示す変数		意味
投入資源	段取り時間	準備(分) 原反やインキや版など、印刷に必要なものを準備する時間。
		調色(分) 本印刷前に、リード紙を用いて試し刷りをして、色や柄など、デザインの再現度を確認する時間。
		立合(分) 本印刷前に、顧客が試し刷りでのデザインの再現度を確認する時間。
		基礎(分) 本印刷前に、インキや機械の状態を複数人で最終確認する時間。
		後始末(分) 印刷に用いたものを後片付けする時間。
	稼働時間	本印刷(分) 製品を作るために機械を回している時間。
	投入数量	印刷機に投入した原反の長さ。
	リード紙m数	印刷機に投入したリード紙の長さ。
	調色回数	本印刷前の試し刷りで、色や柄など、デザインの再現度を確認した回数。
	色数	印刷に用いられたインキや樹脂の数。 (=印刷に使われる版の数)
生産高	(良品である)製造数量	印刷工程で良品と判断された製品の長さ。
	ロスm数	印刷で発生した不良である印刷物の長さ。

4. 製品のグルーピング

4.1. 製品の特徴の抽出

なるべく少ない情報で製品を分類でき、かつ、分類された製品間で明確な差が現れる分類方法は、似ている製品とそうでない製品をより明確に把握できる方法と考えられる。そこで、表2で示した変数に主成分分析を適用し、これらの情報を要約することで、製品を分類する基準(以下、製品の特徴)を抽出した。その手法は以下の通りである。

まず、主成分の解釈を容易にするため、主成分分析の結果に寄与しない変数を除外した。このために、1度目の主成分分析を実施し、各変数が主成分分析にどの程度寄与しているかを確認した。主成分の数は、寄与率が0.1以上の主成分を選択することで決定した。

各主成分の固有値、寄与率および各変数の共通性を表3に示す。その後、共通性を参考に削除する変数を選定した。共通性とは、ある変数が持つ情報量を100%とした場合に、選択された主成分によってその変数の情報がどの程度使用されたかを示す指標である。例えば、ロスm数の場合、主成分1〜3によって合計10%程度の情報が使用されてい

ると解釈できる。削除する変数は、共通性が25%程度以下のものを選択した。これにより、色数、立合、ロスm数の3つの変数を削除した。この「25%」の基準は以下の数式に基づいて算出した。

削除する変数の共通性の目安[%]

$$= \frac{\text{選択した主成分の数}}{\text{最大主成分数(変数の数)}} \times 100 \quad (1)$$

表 3.各変数の共通性

変数名	因子負荷量			共通性(%)
	主成分1	主成分2	主成分3	
色数	0.335	0.384	0.048	26.237
調色回数	0.181	0.613	-0.564	72.571
リード紙	0.378	0.686	-0.113	62.613
投入数	0.862	-0.49	-0.094	99.188
製造数	0.849	-0.501	-0.102	98.264
所要時間準備	0.43	0.598	0.302	63.415
所要時間調色	0.247	0.687	-0.37	66.954
所要時間基礎	0.257	0.271	0.67	58.856
所要時間立合	0.173	0.383	-0.184	21.038
所要時間工程	0.871	-0.469	-0.081	98.567
所要時間後始末	0.347	0.507	0.443	57.284
ロスm数	0.295	0.064	0.117	10.449
固有値	3.061	3.015	1.279	
寄与率	0.255	0.251	0.107	
累積寄与率	0.255	0.506	0.613	

次に、残った9つの変数を用いて製品の特徴を抽出するため、2度目の主成分分析を実施した。主成分の数は、1度目と同様の基準で決定した。各主成分の固有値、寄与率および各変数の主成分に対する因子負荷量を表4に示す。また、因子負荷量を参考にして各主成分の特徴を解釈した。

表4を見ると、第1主成分は、投入数量、製造数量、工程時間と非常に強い相関を持ち、「受注量」に関する情報を示していると解釈できる。同様に、第2主成分を分析した結果、「準備、調色、後始末など印刷に必要な段取り」に関する情報を示していると考えられる。これら2つの主成分を、製品間で差が大きく現れる特徴とした。

なお、第1主成分の寄与率は大いものの、製品のグルーピングにおいては「受注量」以外の特徴を見出せなかった。製造上、受注量は重要な要素ではあるが、製造側でのコントロールが難しいうえ、本印刷の時間の短縮にはつながらない。そのため、次節のグルーピングでは、さらなる解釈の可能性のある第2主成分を分析に用いる。

表 4.主成分分析の結果

変数名	因子負荷量			共通性(%)
	主成分1	主成分2	主成分3	
調色回数	-0.213	0.606	-0.568	73.526
リード紙	-0.105	0.786	-0.111	64.065
投入数	0.986	0.128	-0.081	99.571
製造数	0.988	0.116	-0.084	99.349
所要時間準備	-0.013	0.742	0.303	64.238
所要時間調色	-0.212	0.744	-0.415	77.073
所要時間基礎	0.041	0.414	0.674	62.827
所要時間工程	0.98	0.141	-0.072	98.509
所要時間後始末	-0.028	0.61	0.436	56.309
固有値	3.01	2.681	1.263	
寄与率	0.334	0.298	0.14	
累積寄与率	0.334	0.632	0.773	

4.2. クラスター分析による製品のグルーピング

生産計画の立案や製造原価の見積もりをする際には、製品の製造時間を適切に予測することが重要である。その際、似た特徴を持つ製品には、製造時間の予測値が同程度になることが望ましい。そこで、前項で明らかにした第2主成分の主成分得点に階層的クラスタリングを適用し、類似した特徴を持つ製品を同一グループに分類した。これにより、製品全体をいくつかのグループに分け、各グループに対して適切な製造時間を割り当てる方法を検討した。以下に方法を説明する。なお、階層的クラスタリングを使用するため、使用した解析ソフトの制約から、データ数を500件に

絞って分析を実施した。

まず、クラスタリングを行うために、製品ごとに主成分得点を算出した。そして、それらに階層的クラスタリングを適用し、類似度の高い製品を順次グループ化することで、デンドログラムを作成した。なお、データ間の距離にはユークリッド距離、クラスター手法はウォード法を用いた。

次に、製品をいくつかのグループに分けるかを定めるために、SPRSQ(Semipartial R-Squared, 平方セミパーシャル相関)を参考にした。SPRSQとは、デンドログラムの作成途中で、グループ化した2つのクラスターがどの程度似通っていたかを示す指標であり、データをいくつかのクラスター数で分けるのが妥当であるかを示す。これを用いることで、グループ数は4つが妥当だと考えられたため、製品を4つのグループに分けた。

最後に、あるグループに属する製品には、どのくらい段取り時間がかかるか、また、グループの違いで、どのくらい段取り時間に差が出るのかを定量的に把握するために、第2主成分と相関が強かった準備・調色・後始末時間について、その中央値をグループごとに、図1にまとめた。

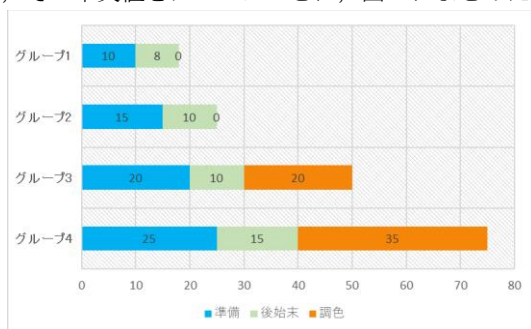


図1.グループごとの段取り時間

図1から、あるグループにかかる段取り時間と、他のグループとの段取り時間の差が読み取れる。例えば、グループ1、2とグループ3、4は、調色時間がかかる/かからないで大別されることがわかる。また、グループ4はグループ3に比べ、調色時間が15分長いことがわかる。

4.3. 製品グループの解釈

4.2節の図1より、グループを分ける一番の要因は、調色時間であると考えられた。そこで、調色時間がかかる製品とかがからない製品を分け、その要因を分析した。調色時間がかからない製品は、なぜ調色時間がかからないのかを、C社の社員にヒアリングした。そして、調色時間のかかる製品は、製品の仕様で製品を層別することで、調色時間を大きくする製品の仕様を明らかにし、なぜその製品の仕様だと調色時間が大きくなるのかを確認した。

まず、調色時間がかからない条件として、以下の3点が挙げられる。

- (A) 黒や白、樹脂など、調色の必要がない色のみでデザインが構成される場合
- (B) 以前に製造した製品と同一の製品を再度製造する際に、残ったインキを使用する場合
- (C) ある製品を製造した後、色や柄が共通する製品を連続して製造する場合

(A)および(B)に関しては、新たにインキを作る必要がないため、調色が発生しない場合である。(C)に関しては、色

や柄が共通する製品が連続する際、先に製造する製品で調色が済んでいることが多く、後に製造される製品についてはデータ上、調色が発生していないように見えることがある。また、色や柄が共通すると、例えば、インキや版の入れ替えといった作業の一部が省略できる。そのため、調色が発生していない場合、調色が発生するときに比べて、準備や後始末の時間が短くなる。

次に、調色時間が長くなる製品の仕様として、以下の2点が挙げられる。

(D) 新規案件である場合

(E) 品質基準が厳しい「特定の得意先」である場合

印刷された色は、インキの濃度や粘度、版に掘られた溝の深さにより、発色の度合いが異なる。初めて製造する製品では、インキや版を新たに製造する必要があり、調色技師が色の検査をより厳格に行うため、調色回数が増える。また、「特定の得意先」とは、特別なデザイン、特別な色を使用する製品を発注する顧客、もしくは顧客自身が製品の立会検査を希望する顧客を指す。このような場合も、調色技師が色の検査を厳格に行うため、調色回数が増加する。

これらの製品の仕様を考慮することで、ある製品がどのグループに属するかを判断することが可能となる。また、図1と照らし合わせることで、その製品を製造する際に必要な段取り時間をあらかじめ予測することができる。この予測を活用することで、工場全体の生産計画や個別製品に対する製造原価の配賦を適切に行うことが期待される。

4.4. グループ化手法の提案

これまでの分析を整理し、製造実績データに基づいた製品のグループ化方法を提案する。

Step 1. 製品の仕様と投入資源・生産高の調査

「版区分」や「得意先」といった製品の仕様、および製造数や製造時間などの投入資源・生産高を把握する。

Step 2. 製品のグループ化

Step 2-1. 製品の特徴の抽出

まず、共通性を用いて、必要のない変数を削除する。次に、「受注量の差」や「段取り時間の差」など、製品間で製造実績に差が出る要因を、主成分分析で把握する。

Step 2-2. クラスタ分析による製品のグループ化

Step 2-1で明らかにした製品の特徴を基に、製品がいくつかのグループに分けられるかを分析する。

Step 2-3. 製品グループの解釈

「版区分」や「得意先」によってグループが分かるといった傾向を製品の仕様から把握し、その要因を考察する。

5. 検証

5.1. 検証方法

4章では、工場の製造実態を適切に把握する方法として、製品をいくつかのグループに分ける手法を検討した。しかし、この手法は「製造実績が似ている製品は、似たような製品仕様を持つはずである」という仮定に基づいており、実際に類似した製品仕様を持つ製品同士の製造実績が一致するかどうか、その妥当性が十分に検証されていない。そこで、本章では、4章で明らかになった工場の製造実態を踏まえて製品の製造時間の一部を予測し、これを製造実績データと比較して、提案手法の妥当性を検証する。

4.3 節では、色や柄が共通する製品を連続して製造する場合には準備や後始末が短縮されること、また、新規の案件や特定の得意先に対応する製品では調色が長くなることが明らかとなった。これらの製造実態を考慮し、製品の仕様に基づいて準備時間や後始末時間と調色時間を予測し、その予測が製造実績とどの程度一致するかを検討した。

5.2. 準備時間と後始末時間についての予測

被印刷体が製品群 N の場合、不燃性や耐電性といった機能性のみを付加することはなく、文字や模様などデザインを付加することがほとんどであり、調色は避けられない工程である。しかし、製造実績データ上では、4.3 節の(C)の理由から、調色時間が 0 分と記載されるデータは半数ほどあった。これは、C 社の生産管理部が、原価を抑える工夫の 1 つとして、「版や色の共通する製品」(≒品名の似た製品)は、1 つの案件としてまとめて作る、という工夫をしていたためであった。図 2 を例に説明する。

図 2 は、2022/3/1 の 20:00~0:35 に連続して作られた、データ上は 5 つの製品の製造実績データを記載したものである。これらは、柄が共通し、色が違うだけの製品の集まりである。まとめて作ること(以下、まとめ生産)で、版の切替えが不要になるなど、準備と後始末の短縮につながる。そのため、生産管理部は、意図して似たような製品を同時に作る。つまり、図 2 の場合、工場の製造実態としては、5 つの製品を別々に作ったと認識するのではなく、赤色の枠でくくられたように、製品 A シリーズとして、1 つの案件について製造を行ったと認識するのが妥当である。

製造日	作業開始時刻	作業終了時刻	品名	色数	準備時間	後始末時間
2022/3/1	20:00	21:05	製品A ①	8	35	10
2022/3/1	21:05	21:55	製品A ②	8	10	10
2022/3/1	21:55	22:45	製品A ③	8	10	10
2022/3/1	22:45	23:35	製品A ④	8	10	10
2022/3/1	23:35	24:35	製品A ⑤	8	10	20
2022/3/1	20:00	24:35	製品A シリーズ	8	75	60

似た製品を1つにまとめる

図 2.まとめ生産

また、図 2 の準備時間を見ると、1 つの案件で最初に作られた製品は、準備時間が 35 分であるのに対し、それ以降に作られた製品は 10 分となっており、準備時間が短縮されることがわかる。そのため、準備時間は、以下の式(2)で予測するのがよいと考えられた。また、同様に、後始末時間は式(3)で予測した。

$$\hat{w}_i = \hat{C}_w + \hat{E}_w \times (n_i - 1) \quad (2)$$

$$\hat{y}_i = \hat{C}_y + \hat{E}_y \times (n_i - 1) \quad (3)$$

w_i : 案件*i*の準備時間, y_i : 案件*i*の後始末時間

C_w : 1 つの案件の最初の準備時間

E_w : 1 つの案件の 1 回当たりの短縮後の準備時間

C_y : 1 つの案件の最後の後始末時間

E_y : 1 つの案件の 1 回当たりの短縮後の後始末時間

n_i : 案件*i*でまとめて作った製品の数

2022/3/1~2023/3/1 に、ある機械 A で作られた 522 件の案件の実測値の分布を調べたところ、正規分布に従わなかった。そこで、それぞれの中央値を C_w および E_w の予測値として用いることにした。その結果、 $\hat{C}_w$ は 20 分、 $\hat{E}_w$ は 10 分と予測された。同様に、 $\hat{C}_y$ は 20 分、 $\hat{E}_y$ は 10 分と予測された。

そして、準備時間と後始末時間を合わせた予測値と実績値の残差から、 $\hat{C}_w$, $\hat{E}_w$, $\hat{C}_y$, $\hat{E}_y$ の当てはまりのよさを確認した。残差は正規分布に従わないため、中央値と四分位範囲で評価した。その結果、残差の中央値 0 分、四分位範囲 10 分となった。これより、予測値の半数以上は誤差 10 分以内に収まるとわかり、予測値は実績値と大きく乖離してないと判断できる。そのため、準備時間と後始末時間を上述の式で予測する方法は有用である。

5.3. 調色時間についての予測

4.2 節の図 1 を見ると、調色が発生した場合、調色時間の中央値は短い場合で 20 分、長い場合で 35 分であることがわかる。また、4.3 節で示した通り、(D)および(E)の仕様に該当する場合は調色時間が長くなる。このため、(D)および(E)に該当する場合は 35 分を、該当しない場合は 20 分を、製品ごとの調色時間の予測値とした。なお、2022/3/1~2023/3/1 に、ある機械 A で作られた 522 件の案件を対象に予測値を求めた。

そして、予測値と実績値の残差から、調色時間の当てはまりのよさを確認した。その結果、残差は中央値 5 分、四分位範囲 15 分となった。中央値が 5 分であることから、予測値が実績値を上回るものが半数以上あり、予測値と実績値には乖離がある可能性が示唆された。そのため、調色時間については、予測方法を再検討する必要がある。

6. 考察

本研究では、製造実績データを基に製品を分類する手法を提案した。これにより、製造実績に差をもたらす製品の仕様を考慮し、類似する製品をまとめることが可能となった。そのため、ある製品の製造時間を予測する段階で、その仕様を把握しておくことで、製造原価や工場の生産計画を適切に予測できる可能性が示唆された。

小堤は、多品種少量生産の製品の製造実績に対してクラスター分析を適用し、製品をいくつかのグループに分類した。しかし、相関の強い変数を考慮せずにクラスター分析を行ったため、数量の差以外の特徴を見出すことはできなかった。これに対し、本研究では、クラスター分析の前に、主成分分析を適用することで、12 の変数のもつ情報から不要な情報を取り除いた。それにより、12 の変数を 3 つの主成分にまとめることができたため、数量の差だけでなく「準備、調色、後始末など、印刷に必要な段取りにも差が生じる」といった特徴を可視化することができた。その結果、本研究は小堤の研究に比べ、製品の特徴をより的確に把握できる方法であるといえる。

7. 結論と今後の課題

本研究では、工場の製造実態を適切に把握するため、似たような製品をまとめることで、多品種少量生産における、製造実績に基づいた製品のグルーピング手法を提案した。

今後の課題として、本研究で明らかにした製品の分類を活用し、製造原価の見積もりや生産計画の立案を行うことで、本研究の実務での適用可能性を検証する必要がある。

参考文献

[1] 小堤瞭(2023):“多品種小ロット生産における製造実態の分析方法に関する研究”