

統計的手法を活用した加工条件の最適化

株式会社 アーレスティ
品質管理部 品質管理課
大川 嘉一

1. はじめに

当社では、四輪自動車、船外機などのアルミニウムダイカスト(Die Casting)部品の casting 及び加工を行っている。当社で最も多く使用されている加工工法が切削加工である。切削加工とは、工作機械と切削工具を用いて切り屑を出しながら、材料を所定の寸法形状および表面精度に仕上げる加工方法である。その中でも、多数の切れ刃を持つ刃物（フライス）を回転、移動させることで面加工を行う方法がフライス加工である。工具回転軸が加工面に対して水平となる横フライスと、垂直となる正面フライスがある。

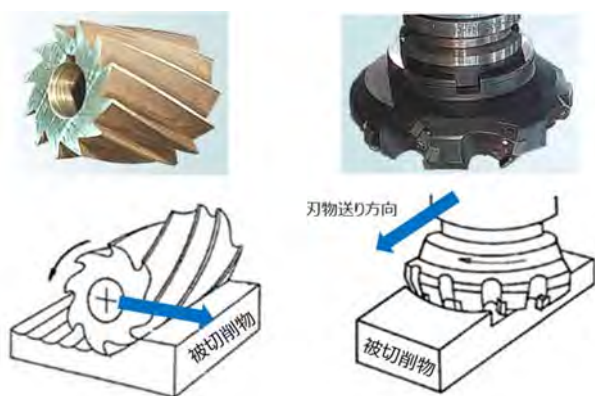


Fig.1 フライス加工方法の種類

(左：横フライス 右：正面フライス)

本報告は、ある製品のフライス加工面の品質特性を改善するため、品質特性とそれに影響する因子についての因果関係を調査、解析を行い、品質・生産性の両面から製造条件の最適化を行った事例を紹介する。

2. 背景

Fig.2 には、ある製品（フライス加工後）の一部分を示している。図中に矢印で示した部位を境に加工面の光沢が異なっている。この境が今回注目する品質特性の『段差』である。この段差を接触式表面粗さ測定機（表面粗さ測定機）で測定した結果を Fig.3 に示す。段差の大きさは規格が決められており、段差の大きさにバラつきはあるが、規格を満足しない製品が発生することから、フライス加工後の後工程で段差の検査 及び 手直しが発生していた。

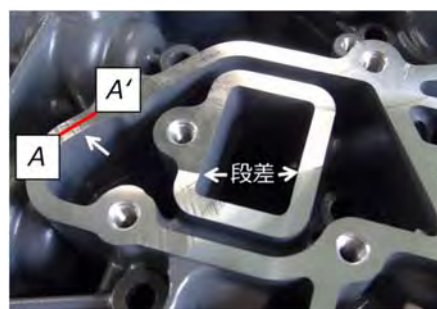


Fig.2 対象製品（部分抜粋）

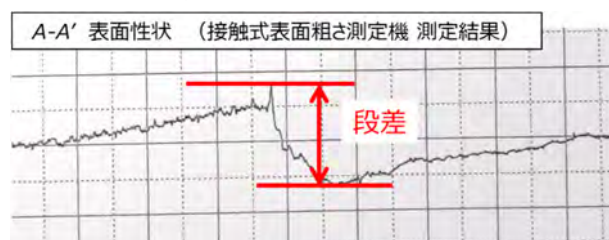


Fig.3 段差の状況

3. 現状把握

段差の発生状況 及び 段差のレベルについて調査を行った。段差は3か所に発生しており、加工面にフライス加工の軌跡（加工パス）を重ね合わせてみ

ると、1パス目と2パス目の重なりあった部分に発生していることが分かる。(Fig.4) また、量産工程から20台をサンプリングし工程能力指数(Cpk)を調査した。(Fig.5) 今回の対象部位は重要品質部位となりCpk>1.67以上が必要とされるが、部位①及び②のCpkが小さいことが分かる。これは上限規格側に偏っていることが原因である。

本活動では、発生している段差を低減させることで、Cpkの向上と別工程で実施している手直しを廃止することを目標とする。

目標値：段差 Cpk > 1.67



Fig.4 段差発生部位と加工領域

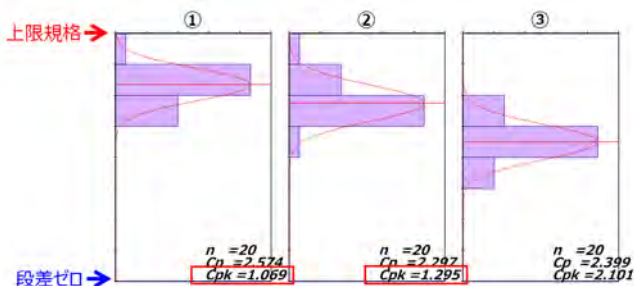


Fig.5 部位毎のヒストグラム

4. 要因解析

現状把握から加工部位や加工軌跡、さらに一般的に加工面品質に影響を及ぼすと言われている刃物仕様、治具仕様、設備精度が段差に影響していることが考えられる。これらをもとに特性要因図を書いた。さらに、技術的知見や類似製品の状況を考慮して重要要因を絞り込んだ。(Fig.6)

それぞれの重要要因についての検証内容、目論見、検証方法(実験方法)を整理した。(Table.1) 過去の知見や文献などを参考に、交互作用が考えられる

因子については二元配置実験を実施することにした。



Fig.6 加工面段差発生に対する特性要因図

Table.1 重要要因のまとめと実験計画

重要要因	検証内容	目論見	検証方法
ワイパー設定値が大きい	ワイパー設定値の影響	切削抵抗の変動を低減	一元配置実験
取り代が大きい	取り代の大小による影響	切削抵抗の低減	
アッパーカットによる加工	加工方向による影響	切削抵抗の低減	
切削速度の変化がある	速度変化の有無による影響	切削抵抗の変動を低減	二元配置実験
高回転・高送り	回転数・切削送り速度による影響	切削抵抗の低減 回転振れの低減	

5. 要因検証

5.1 評価方法

段差発生部位①～③を表面粗さ測定機で測定した段差を特性値とした。(Fig.3 参照) 但し、以降で説明するものは、段差の一番大きい部位①についての結果を示す。

5.2 ワイパー設定値

今回使用する刃物には、切削を主に行う切削刃と面粗度を向上させるためのワイパーが取り付けられている。ワイパーは切削刃よりも突出している。この突出し量を水準(ワイパー設定値)として一元配置実験を行った。(Fig.7) 結果、ワイパー設定値は高度に有意であることが分かった。さらに、水準間の有意差を確認し(Table.3)、設定値中～大では有意差は無いことが分かった。

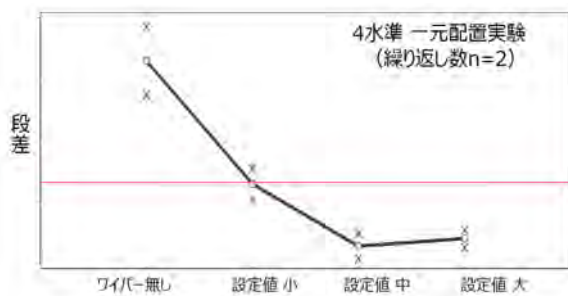


Fig.7 部位①の段差 (ワイパー設定値による差)

Table.2 分散分析表

要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P値 (上側)
ワイパー設定値	47.42	3	15.81	19.38	**	0.008
誤差	3.262	4	0.816			
計	50.68	7				

Table.3 水準間の有意差

ワイパー設定値	母平均の差			lsd	検定
	点推定値	下限 (95%)	上限 (95%)		
無し 小	3.233	0.725	5.74	2.507	*
無し 中	6.031	3.524	8.538	2.507	*
無し 大	5.794	3.287	8.301	2.507	*
小 中	2.799	0.291	5.306	2.507	*
小 大	2.562	0.054	5.069	2.507	*
中 大	-0.237	-2.744	2.27	2.507	

5.3 取り代とツールパス

過去の知見やノウハウから、取り代の大小とツールパス (ダウンカット、アップercット) が段差に影響することが考えられたため、それぞれについて一元配置実験を行ったが、有意差は確認されなかった。

5.4 切削速度変化

現状調査より部位①の段差が大きいことが分かっている。さらに加工軌跡について詳しく調査を行ったところ、部位①加工中に加工軌跡が変化していることが分かった。フライス加工の特性上、軌跡の変化は切削速度変化となるため、この影響について一元配置実験を行った。(Fig.8) 結果、加工軌跡の変化 すなわち 切削速度変化の有無は高度に有意であることが分かった。

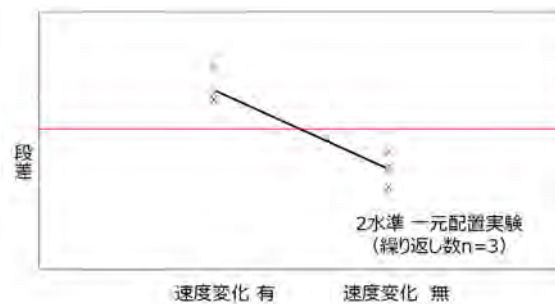


Fig.8 部位①の段差 (切削速度変化 有無による差)

Table.4 分散分析表

要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P値 (上側)
速度変化有無	1.37	1	1.37	29.44	**	0.006
誤差	0.186	4	0.047			
計	1.556	5				

5.5 回転数、送り速度

回転数と送り速度については、交互作用が考えられるため二元配置実験を行った。(Fig.9) 結果、回転数は高度に有意となったが、送り速度は有意とならなかった。但し、有意となった回転数であるが、回転数 中～低は有意ではなかった。Fig.9 右下図から交互作用の疑いがあったが、分散分析表 (Table.5) より 今回の実験条件下では交互作用は無いと判断できる。

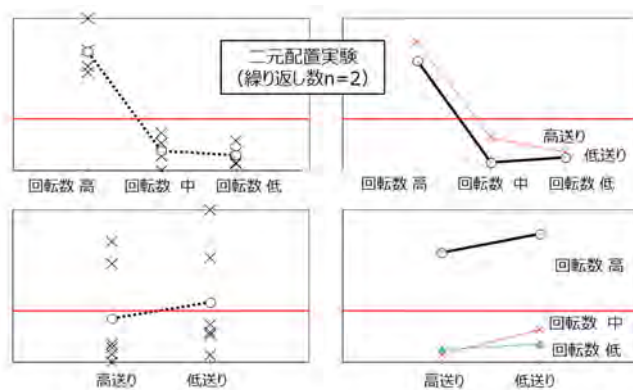


Fig.9 部位①の段差 (高回転、高送りによる差)

Table.5 分散分析表 (送り速度要因 プーリング後)

要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P値
回転数	3.49	2	1.74	52.17	**	0
交互作用	0.10	1	0.10	3.08		0.117
誤差	0.26	8	0.03			
計	3.86	11				

6. 最適案の検討

6.1 最適条件の方向性

要因検証の結果より、要因配置実験で有意となった条件（ワイパー設定値、切削速度変化、回転数、送り速度）さらに刃物摩耗を低減する条件で最適条件の方向性を決定した。

5.5 より、段差を小さくするためには回転数を下げる必要があるということが分かっている。しかし、送り速度に関しては有意差が無かったことより、送り速度を上げることが可能であることが分かった。送り速度を上げるとは、生産性を向上させることになるため、品質と生産性を向上させるための最適水準を検討することとした。

6.2 実験計画の立案

回転数と送り速度の最適条件を探索する実験を行った。現行条件から切削理論上の限界までの領域（最適条件範囲）で水準を設定し実験を行うこととした。実験計画は、中心複合計画を採用した。実験回数は12回である。

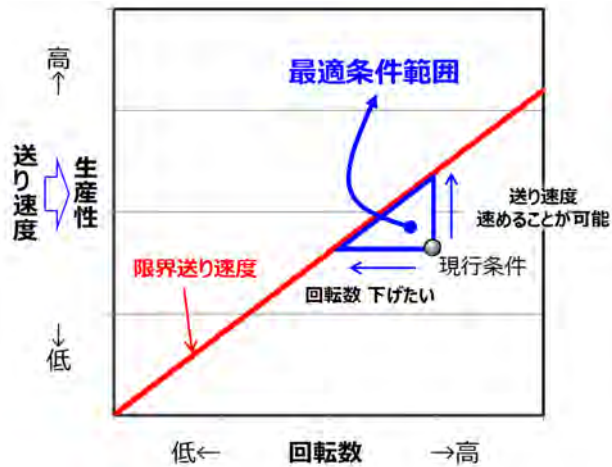


Fig.10 設定可能な回転数と送り速度範囲

Table.6 応答曲面実験計画

因子	水準1	水準2
回転数	回転数 中	回転数 大
送り速度	低送り	高送り
計画	中心複合計画	
α点	1.417 (回転可能)	
中心点繰返	4回	

6.3 実験結果と最適条件の決定

実験結果を Fig.11 に示す。得られた応答曲面の統計検定量 及び 分散分析表から、回帰式は高度に有意であることが分かる。

応答曲面結果より、最適条件を決定した。回転数を限界まで下げることで最小段差が望めるが、生産性も考慮し Fig.11 に示す条件とした。現行条件に対して、要因検証で有意となった条件に変更し、回転数を下げることで段差が低減でき、送り速度を上げることで、生産性の向上にもつなげることが期待できる条件とした。

Table.7 統計検定量

目的変数名	重相関係数	寄与率R ²	R* ²	R** ²
段差	0.928	0.86	0.78	0.713
	残差自由度	残差標準偏差		
	7	0.309		

Table.8 分散分析表（プーリング後）

要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P値 (上側)
回帰	4.102	4	1.025	10.773 2	**	0.004
残差	0.666	7	0.095			
計	4.768	11				

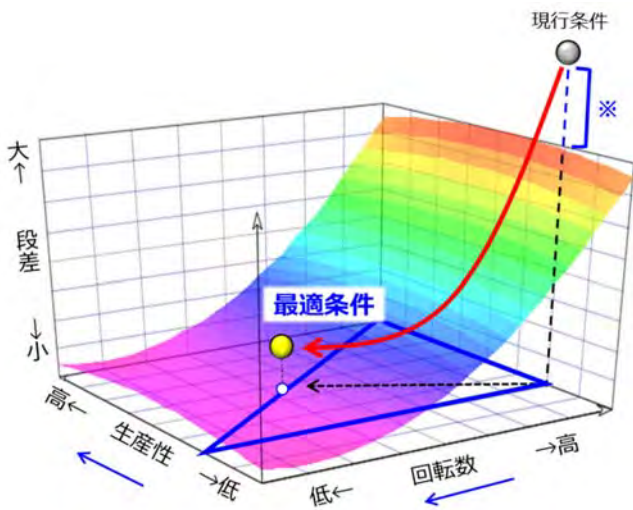
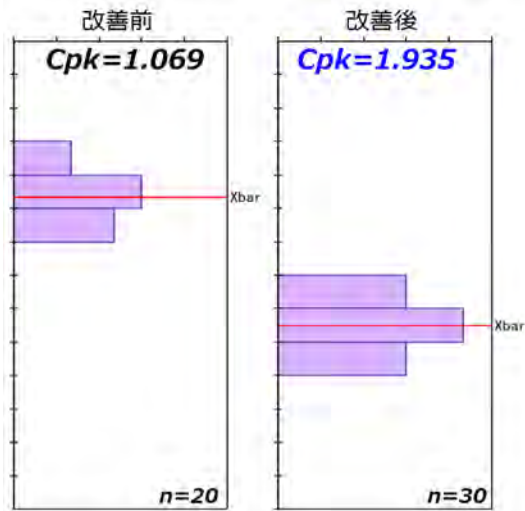


Fig.11 段差に対する回転数と送り速度の応答曲面 (3D)

※ワイパー設定値、ツールパスの最適化による効果

7. 効果確認

6. 得られた最適水準を量産工程へ適応し、30台のサンプリング結果（改善後）と改善前の母平均の差の検定を行った。その結果、改善によって段差の母平均が改善された（低減できた）と判断された。さらに、目標である $Cpk > 1.67$ を達成できた。



仮説 H_0 は有意水準 1% で棄却される
 (t検定: $24.052 \geq 2.682$)
 仮説 H_0 は有意水準 5% で棄却される
 (t検定: $24.052 \geq 2.011$)

Fig.12 母平均の差の検定（改善前と改善後）

8. 維持管理

8.1 管理図管理

最適条件を量産工程に適応後、 $n=3$ 台/日の抜き取り検査を行い、管理図管理を実施している。その中で、安定状態か否か判定すると安定状態にないことが検出された。刃物を確認すると損傷があり、工程の異常を管理図で発見することができた。今後も、この変化を管理図で捉え、不具合品の流出防止を図っている。

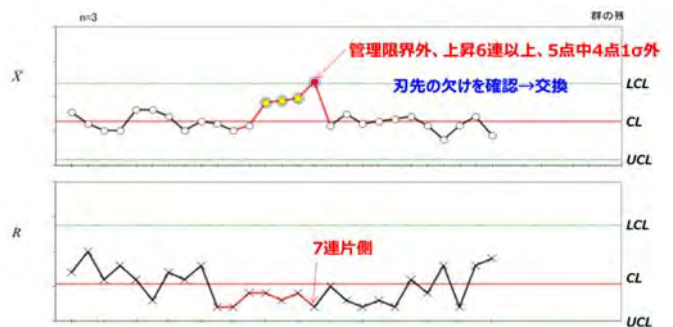


Fig.13 管理図管理

8.2 標準化

今回得られた成果を加工条件設定 チェックシートへ追記し、今後立ち上がる新規製品の工程設計や条件設計へ折り込めるようにした。

9. 総括

ある製品の機械加工面に発生した段差を低減するため、統計的手法を活用し改善を行った。要因配置実験を用いて要因の特定を行い、応答曲面法により品質と生産性の両面から最適条件を見つけ出すことができた。これにより、工程能力指数の向上、さらに手直し工程の削減にも貢献できた。今後は、管理図による工程管理を通して異常の早期発見、流出防止を行ってゆく。

参考文献

奥原正夫・加瀬三千雄（2011）

『管理図・SPC・MSA 入門』棟近雅彦監修，日科技連出版社.

山田秀・立林和夫・吉野睦（2015）

『パラメータ設計・応答曲面法 ロバスト最適化入門』棟近雅彦監修，日科技連出版社.

永田靖（2014）『品質管理セミナー・ベーシックコース・テキスト 分散分析』日本科学技術連盟.

尾島善一（2014）『品質管理セミナー・ベーシックコース・テキスト 検定と推定』日本科学技術連盟.

解析ソフト

JUSE-StatWorks/V5

株式会社 日本科学技術研修所

本著作物は原著作者の許可を得て、株式会社日本科学技術研修所（以下弊社）が掲載しています。本著作物の著作権については、制作した原著作者に帰属します。

原著作者および弊社の許可なく営利・非営利・イントラネットを問わず、本著作物の複製・転用・販売等を禁止します。

所属および役職等は、公開当時のものです。

■公開資料ページ

弊社ウェブページで各種資料をご覧ください <http://www.i-juse.co.jp/statistics/jirei/>

■お問い合わせ先

(株)日科技研 数理事業部 パッケージサポート係 <http://www.i-juse.co.jp/statistics/support/contact.html>