

小型船外機エンジン アルミ部品コストダウンへの取組み ～理論値に基づいた高品質・高能率切削加工～

Small Outboard Motors: Aluminum Parts Cost Cutting Initiatives
- High Quality, Highly Efficient Cutting Processes Based on Theoretical Values -

中井 典子 坂本 祐輔

当論文は、日本プラントメンテナンス協会 (JIPM) の2014年度TPM優秀論文賞を受賞した内容に基づくものです。

要旨

近年、BRICS諸国の急成長によるマリレジャーの多角化や、北米を中心とした環境対応、アジア・アフリカを中心とした根強い2ストロークエンジン要望など、顧客ニーズが多様化している。当社の船外機事業もこれに対して多彩な商品群を持つことで幅広いお客様にご支持をいただいていた。一方、製造側にはこの多種多様な商品の製造に迅速に対応できる高い加工技術に加え、近年は国際競争力(特にコスト競争力)が求められている。

今回の取組み対象であるシリンダライナ部は高温にさらされながらピストンと摺動する重要部位である。通常この加工には主軸剛性の高いボーリング専用機を用いるが、これは高額な上に汎用性も乏しい。そこで、今回の取組みでは「設備・刃具等の道具の選定方法」、「切削条件などパラメータ設定方法」に安定限界理論を用いることにより、安価な汎用機で高精度・高能率切削を可能にした。

Abstract

Recent years have seen diversification in customer needs including diversifying marine leisure activities (driven by rapid growth in BRICS economies), environmental compliance (primarily in North America), and strong 2-stroke engine demand in Asia and Africa. Yamaha Motor's outboard products are popular with a wide range of customers thanks to our varied product range that caters to these diverse needs. From a manufacturing perspective however, diversity had led to demand for high-level processing technology capable of prompt and flexible response to manufacturing requirements for varied and versatile products, and in recent years, demand for international competitiveness (particularly cost competitiveness) as well.

The cylinder liner part at the focus of this initiative is a critical part that is exposed to high temperatures as it slides with the pistons. In general, dedicated boring machinery with high shaft rigidity is used for this process, but this is expensive and lacks versatility. With this initiative, we have realized high precision and highly efficient cutting with a versatile low-cost machine, by applying stable limit theory to "tool selection methods for equipment/cutting tools etc." and "parameter setting methods such as cutting conditions."

1 はじめに

当社の船外機事業は1960年のP-7販売開始から50周年を迎え、様々な使われ方をするお客様からご支持をいただき、高いシェアを得ている。商品も2～350馬力、環境対応の4ストロークエンジンと根強い人気の2ストロークエンジンがラインナップされ、多くの商品群を誇る。近年、この多種多様な商品の製造に迅速に対応(少量生産)しつつ、国際的なコスト競争力を高めることが製造側に求められている。

ヤマハ熊本プロダクツ(YKP)は熊本県八代市に工場を持ち、中・小型の船外機の素形加工から塗装・SMC(sheet

molding compound)・組立てまでを行える一貫工場である。中・小型の船外機はアジア・アフリカ市場での需要が高く、競合他社は15年ほど前から人件費の安いアジアでの生産をスタートさせている。しかしアジア諸国の賃金はこの10年間で約2倍になっており、海外生産のメリットが徐々に減少しつつある(図1)^[1]。特にコストにおける設備費のウエイトが高い機械加工分野では、設備寿命までに海外生産による効果を出し切れない場合もあり、必ずしも「海外生産が有利である」とはいえない状況になっている。

Small Outboard Motors: Aluminum Parts Cost Cutting Initiatives - High Quality, Highly Efficient Cutting Processes Based on Theoretical Values -

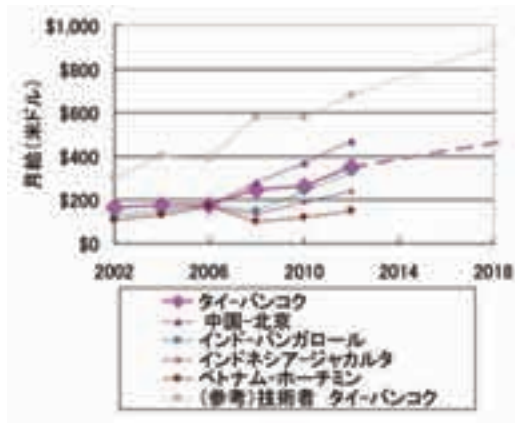


図1 アジア諸国の10年間の賃金変化（一般工）

この外部環境の変化を踏まえ、コスト競争力に直結する機械加工設備費に着目し、安定限界理論をシリンダライナ(図2)のボーリング加工に適用することによって「製品の品質向上と設備のダウンサイジングを両立」した事例を紹介する。



図2 船外機外観とシリンダライナ^[2]

2 シリンダライナ加工設備概要

2-1. 改善対象ラインの概要

今回の取組み対象である船外機エンジンはクランクケースとシリンダボディが一体のシリンダブロックを採用しており、アルミ製のシリンダブロックに鋳鉄のシリンダライナを圧入した後に、ボーリング加工、ホーニング加工を施している。YKPのクランクケース加工ラインは電子部品の少ない機械式の単能機が多く、確固とした保全技術を持っていれば海外で新たに設備投資をしてラインを作るよりも故障しにくく安価に生産できるラインといえる。しかし、今回改善を行ったラインは導入から二十数年が経過し老朽化している設備があり、設備故障によるライン停止や精度不良による手直しコストの増大が問題となっていた。

2-2. 対象設備の概要

今回はシリンダライナを加工しているスリーブボーリング専用機（1987年製造）を対象に改善を行った。本設備は別の工程で加工したヘッド面ノックを基準としてスリーブボーリングの荒・仕上げ加工を同時に行っている。シリンダライナ部はピストン（リング）との摺動箇所であり、耐摩耗性の高い鋳鉄ライナ材を高い円筒度と位置精度で加工しなければならない、「高負荷でかつ高精度加工」が要求される工程である。この設備の特徴を以下に記す（図3、4）。

- 剛性が高い
- 2軸同時加工が可能（高速加工）
- 計測、補正が自動化されている



図3 スリーブボーリング専用機

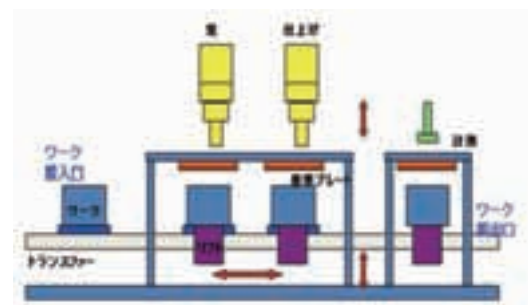


図4 概要図

2-3. 設備の問題点

加工基準となるヘッド面ノックからのスリーブの位置精度が規格に対し大きくバラつく問題が発生した(図5)。このため4時間に1回のペースで微調整を実施しなければならず、生産上大きなネックとなっていた。

Small Outboard Motors: Aluminum Parts Cost Cutting Initiatives
- High Quality, Highly Efficient Cutting Processes Based on Theoretical Values -

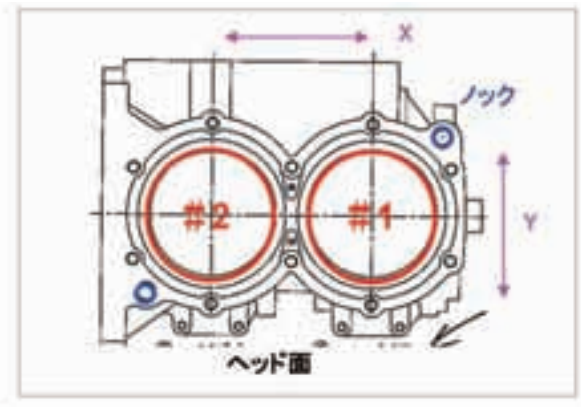


図5 スリーブとノックの位置関係

設備の問題点を把握するため、静的精度を調査したところ、Z軸の傾きとクランプ力、治具の精度(ワークの位置決めピンとワークのクリアランス大)の低下が確認された。あるべき状態まで復元を行ったが、ばらつきを抑えることはできなかった(図6)。



図6 調整風景

※治具にダイヤルを当て微調整を実施している

時間帯によってワーク精度が変化していたことから、ばらつきの原因が熱変位にあると考え、外気温に対するそれぞれの影響度(コラムの歪み量、ボアの位置精度など)について調査を実施した(図7)。図8に示すとおり、外気温が10℃上昇するにつれてコラム歪み量が100 μ m変動しており、それに追従するようにボアの位置度も100 μ m程度変動していた。変位(温度)勾配も緩く温度調整も難しいうえに、老朽化が進み部品供給も難しいことから設備更新を実施することとした。



図7 測定風景

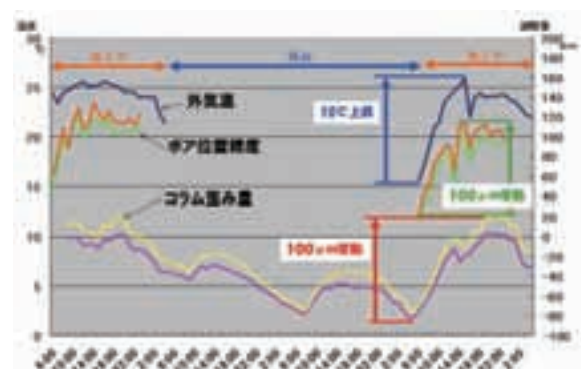


図8 熱変位測定

3 設備の導入

3-1. 加工設備の検討

今回、新規設備の候補としたのは以下2種類である。

- ボーリング専用機(現状と同型)
- マシニングセンタ(汎用機)

表1に項目別に比較した結果を示す。2.2章でも述べたように、これまで用いてきた専用機は剛性が高く、また2軸同時加工ができるため加工時間が短いメリットがある。しかし設備コストは高く、設備製作時間も約1年半と長い。それに対しマシニングセンタは設備導入時期が短く、またコストが安いといった大きなメリットがある。

表1 専用機とマシニングセンタの比較

	Bo専用機	汎用M/C
軸数	2軸 ○	1軸 △
サイクルタイム	短 ○	長 △
主軸剛性	高剛性 ◎	低剛性 ○
価格	高価 △	安価 ◎
設備導入LT	長 △	短 ◎

Small Outboard Motors: Aluminum Parts Cost Cutting Initiatives - High Quality, Highly Efficient Cutting Processes Based on Theoretical Values -

3-2. マシニングセンタの課題

マシニングセンタのデメリットとしては、加工時間が長いことが挙げられる。専用機は2軸同時加工しているのに対し、マシニングセンタは1軸しかないので、加工時間は約2倍に延びる。今回の設備更新のきっかけとなったノックとボアの位置精度向上のためには、工程を分けず同じ設備で加工がきるマシニングセンタが有利ではあるが、これまでの荒・仕上げのボーリング加工に加えノック穴の加工時間を加算すると、なりゆきのマシンタイムは図9のように増大する。従ってマシンタイムを目標時間内に抑えるためには、マシニングセンタを2台投入するか、もしくは加工時間を半分にするかのどちらかを実現しなければならない。マシニングセンタを2台導入する方法は安易ではあるが投資コストの増大は避けられないため現実的ではない。加工時間を半分にするためには高能率化する必要があるが、マシニングセンタは専用機と比べ主軸剛性が低く、びびりなどの品質低下を引き起こす可能性が高い。

上述の課題をクリアするためには、想定されるびびりの問題を解決する必要がある。まず試切削を行いびびり発生の現状把握を行った。

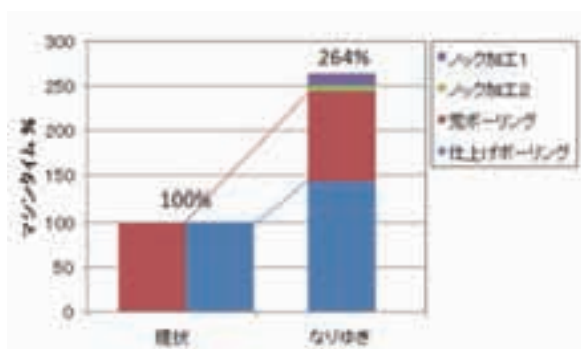


図9 マシンタイム

4 びびり対策について

4-1. 試切削によるびびりの現状把握

図10は専用機と同等の荒加工用ボーリングツール（図11）を用いて、マシニングセンタで試切削を行った結果である。ボアの口元で激しいびびりが発生し、ひどい物ではスリーブが破損するケースも見られた。

この振動を解析したところ、主軸回転数とは異なる周波数帯で、なおかつ主軸の固有振動数とほぼ同じ周波数で発生していたことから、自励振動による再生びびりの可能性があると考え、振動解析技術を用いて主軸（設備・刃具）の動剛性特性と切削機構の解析を実施し、最適な切削方法を導出するアプローチを行った。



図10 主軸剛性の影響（びびり）



図11 荒ボーリングツール（5枚刃）

4-2. びびりと安定限界理論について

先の試験結果のようにびびりが発生すると、びびりマークと呼ばれる周期的な模様を発生させ、表面粗さを低下させる。また切削抵抗が不均一に変動するため、切れ刃の欠損、異常摩耗が進行するなど刃物側への影響も大きく、場合によっては工作機械の構造系の故障などを引き起こす要因となる^[3]。

一般的にびびりの抑制には主軸の回転数や送り量、切込み量などの切削条件を制限する対策がなされるが、今回は高能率加工が必須であるため、品質と能率を両立させ得る切削条件を導き出す必要がある。そのため、びびりを発生させることなく切削できる安定領域を見える化する方法として安定限界理論を適用することにした。

4-3. 安定限界曲線とは

図12に安定限界曲線を示す。これは主軸の剛性測定から求めた振動特性と、被削材種や切削条件などの諸条件から求められるグラフで、びびりが発生しにくい主軸回転を知ることができる。びびりが発生しない安定領域は共振周波数の整数分の1ごとに領域が高くなり、高速になるほど広くなる。共振点付近にあるポケットを第1として第5ポケットまでが有効であり、それ以下のポケットに関しては徐々に誤差が大きくなっていく^[4]。従ってアルミのような軟質金属において安定して高速切削できる回転数を選択することが可能となる。

Small Outboard Motors: Aluminum Parts Cost Cutting Initiatives
- High Quality, Highly Efficient Cutting Processes Based on Theoretical Values -

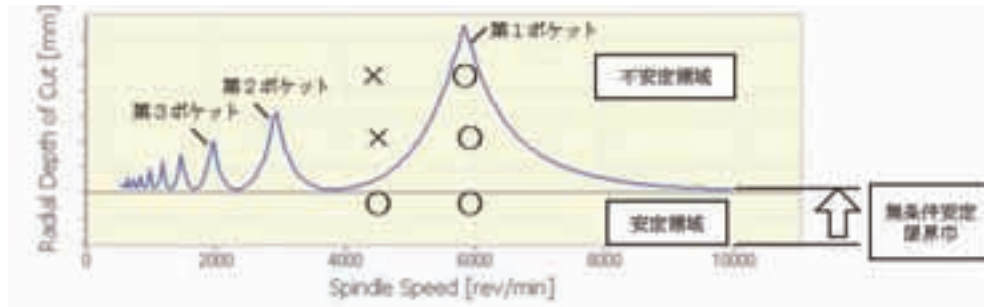


図12 安定限界曲線

4-4. 安定限界曲線の導出方法

切削系を1自由度の振動系と仮定するとその系の運動方程式は下記で示される。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = f(t) \quad (1)$$

m:質量、c:粘性減衰係数、k:ばね剛性

y:変位、f(t):外力

ここで外力 f(t) には再生効果が生じる。この場合、f(t) は下記で表される。

$$f(t) = K_f \cdot a(t) [h - \{y(t) - y(t-T)\}] \quad (2)$$

K_f:比切削抵抗、a(t):切削巾、h:取しろ

y(t):変位

この微分方程式(1)をy(t)について解くと再生びりりの振動変位が得られる^[5]。

上の運動方程式をラプラス変換して、取しろ一変位の伝達関数を求めると下記になる。

$$G(s) = \frac{Y(s)}{h} = \frac{K_f \cdot A(s) \cdot \Phi(s)}{1 + (1 - e^{-sT}) \cdot K_f \cdot A(s) \cdot \Phi(s)} \quad (3)$$

G:伝達関数、Φ:機械構造の伝達関数

この系の安定性（振動が増幅 or 減衰）は G(s) の分母 $1 + (1 - e^{-sT}) \cdot K_f \cdot A(s) \cdot \Phi(s)$ で判別できる。切削巾 a を定数とみなし、これが減衰と発散の臨界状態となる切削巾 a_{lim} を回転数ごとにプロットすると図 12 のグラフを求めることができる^[6]。

これを踏まえ、先ほど 4-1. で試切削したツールに対し、安定限界曲線を求めたのが図 13 である。グラフから、狙いの主軸回転数付近での安定限界曲線が取しろ 2mm を下回っており、びりりが発生しやすい状態であることがわかる。

この結果より、なりゆきの状態では切削できないことが理論的にも裏付けられたことから、対策を実行することとした。

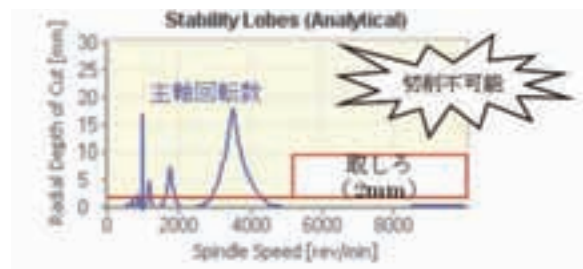


図13 荒ボーリングツールの安定限界曲線

4-5. 過去の実績と現在の比較

前節の安定限界理論は、他の取組みでも用いられ効果を発揮してきた。例えば主軸剛性評価による設備比較や、エンドミル加工のびりり対策などである。エンドミル加工の事例では、アルミを対象としていたことから高速切削であったため有効ポケットを狙うことができた。また幾何公差は表面粗さのみであり、要求精度もそれほど高くはなかった。

しかし、今回ターゲットとしているのはボーリング加工であり、これは表面粗さに加え真円度、円筒度と幾何公差が増え、さらに要求精度が高い。また対象としている被削材が鋳鉄スリーブであるため周速が上げられず、高回転領域にある有効ポケットを狙いにくい傾向にある（表 2）。

表 2 過去の実績と現在の比較

	過去の実績	新たな取組み
加工要素	エンドミル加工	ボーリング加工
被削材	アルミ	鋳鉄
切削速度	高速	低速
幾何公差	表面粗さ	表面粗さ、真円度、円筒度
要求精度	低	高

Small Outboard Motors: Aluminum Parts Cost Cutting Initiatives
- High Quality, Highly Efficient Cutting Processes Based on Theoretical Values -

4-6. 安定限界理論のアプローチ方法

びびりの発生は、安定限界曲線が取しをを上回る領域の回転数を選ぶことで抑制できる(図14の①)。この方法が最も一般的であり簡単ではあるが、周速が上がるため刃物の低寿命化に繋がる恐れがあり、今回のように低速切削の場合は安易に採用できない。従って、今回はもう一つのアプローチ方法である無条件安定限界巾を広げる(図14の②)方向で進めることにした。

無条件安定限界巾は以下の式から求められる。

$$\text{無条件安定限界巾} = \frac{1}{2(\text{最大負実部}) \cdot (\text{動的比切削抵抗})} \quad (4)$$

この式は最大負実部もしくは動的比切削抵抗の値を下げることで無条件安定限界巾が広がることを意味している。最大負実部は主軸やツールの動特性にあたり、剛性を上げることで値を小さくすることができる。例えば大型の工作機械に変更する、ツールを短くするなどである。しかし機械の変更はコストの面から見ても容易ではなく、またツール長に関しても現状が最短であったため、次に動的比切削抵抗を下げる検討をした。動的比切削抵抗はワークの特性や刃先緒元によって決まるもので、その中から今回は刃数を最適化することにより対策を行った。

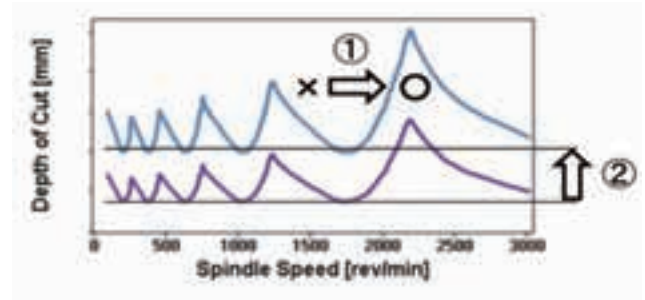
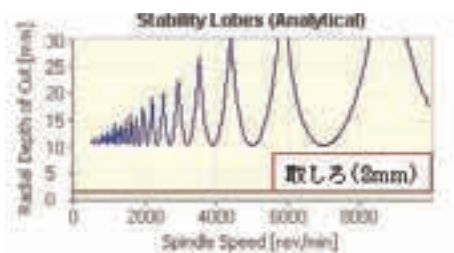


図14 安定限界のアプローチ方法

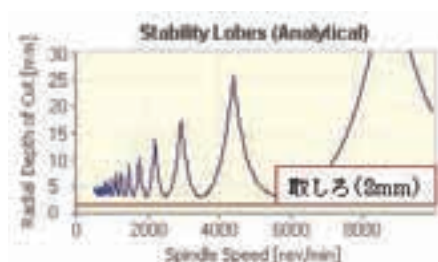
4-7. 刃数の最適化

一般的に刃数を増やすのは加工能率を上げ、一刃あたりの仕事量を減らすことで刃具寿命を延ばすといった効果を見込んでいる場合が多い。しかしこれがびびりやすさに繋がることはあまり知られていない。

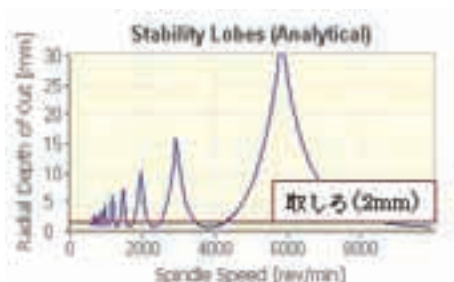
前出のツールに対して刃数ごとに安定限界曲線を求めた結果を図15に示す。刃数を増やすことで第1ポケットの回転数が低速よりになり、併せて無条件安定限界巾が狭くなっていることがわかる。これは共振周波数が固有振動数 $\times 60/\text{刃数}$ によって求められるため、刃数が増えるほど第1ポケットは低回転領域に下がる^[7]。またボーリングのように多数の刃が同時に切削している加工では、刃数が増えるほど切削中に主軸にかかる負荷が高くなり、びびりが発生



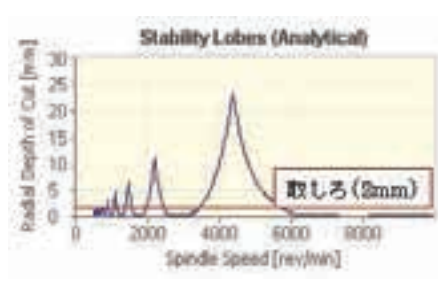
(a) 1 枚刃



(b) 2 枚刃



(c) 3 枚刃



(d) 4 枚刃

図15 刃数と安定限界の関係

Small Outboard Motors: Aluminum Parts Cost Cutting Initiatives - High Quality, Highly Efficient Cutting Processes Based on Theoretical Values -

しやすくなることから無条件安定限界巾は小さくなる。

以上を踏まえ最適な刃数を求めた結果、無条件安定限界巾が取しろ以上になるのは2枚刃以下であることがわかった。その中から今回は加工能率を考慮して2枚刃のツールを採用することにした。

4-8. 結果

最適化した刃数でツールを作製し、切削トライを実施した結果を図16、17に示す。専用機の条件から能率を2.7倍に上げて切削してもびびりは発生せず、真円度・円筒度・表面粗さなどの幾何公差に対しても規格値以下を達成した。以上の結果より、汎用のマシニングセンタでも最適なツールを用いることで品質を向上しつつマシンタイムを短縮できることがわかった。

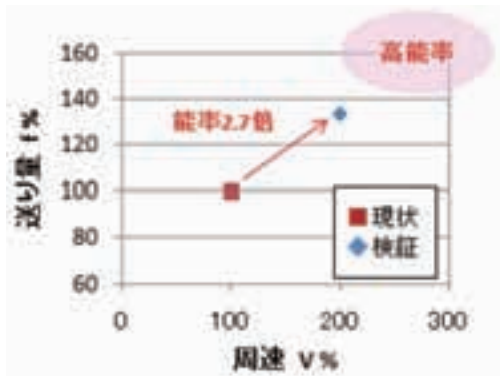


図16 加工能率



図17 切削面

5 仕上げボーリング加工への展開

前章では荒ボーリング加工の対策を実施し、能率と品質の両方を向上させることができた。しかし、まだ目標のマシンタイムには届かないため、仕上げ加工についても高能率化の検討を行った。

ここでまず現状調査として振動測定を行い、安定限界曲線を求めた結果を図18に示す。生産では品質不良を懸念して

条件を下げて加工していたが、安定限界曲線が仕上げの取りしろを大幅に上回っていたことから、びびりは発生しないとの結果を得た。また今回の活動以前から高速切削用のCBN（立方晶窒化ホウ素）チップを使用しており、刃具寿命低下の恐れもないことから、周速を上げることで大幅な高能率化を実施した。

図19に示す切削結果より、加工能率を3.4倍に上げててもびびりは発生せず品質は維持できることから、汎用の1軸のマシニングセンタでも現状の専用機（2軸）と同等のマシンタイムでの加工を実現する見通しを得ることができた。

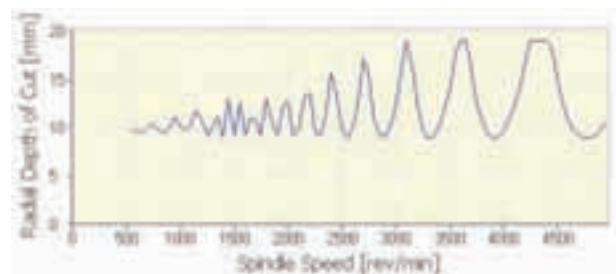


図18 仕上げボーリング加工の安定限界曲線

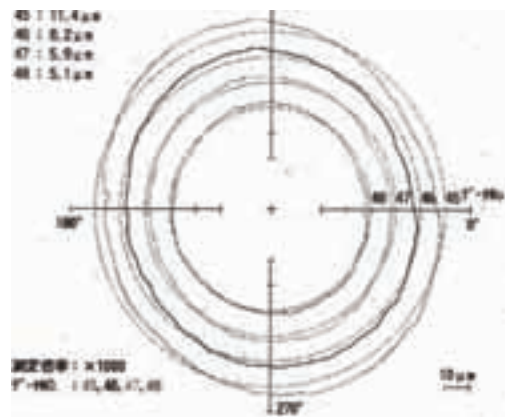


図19 切削検証結果

6 まとめ

今回の取組みでは、設備更新において目標としているコストダウン達成のために汎用のマシニングセンタの採用を前提に検討してきた。低剛性といわれるマシニングセンタで試切削していく中で様々な課題が発生したものの、動剛性評価と解析技術を確認し、切削条件を理論的に導き出すことから高負荷高能率切削を実現させ、設備のダウンサイジングに成功した。

Small Outboard Motors: Aluminum Parts Cost Cutting Initiatives - High Quality, Highly Efficient Cutting Processes Based on Theoretical Values -

この活動によって以下の効果を得ることができた。

- ① マシニングセンタの場合、なりゆきではマシンタイムが設備更新前と比べ 2.6 倍とネック工程になってしまうところだが、安定限界理論を使い最適なツールの選択と切削条件を導き出すことで目標を達成した（図 20）。

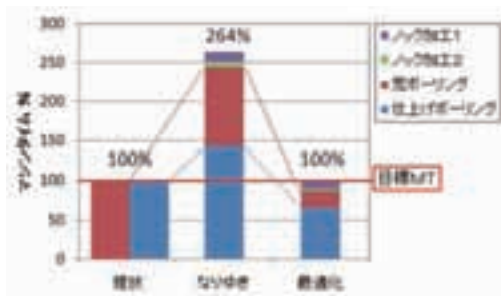


図20 マシンタイムの効果

- ② 投資コストについても通常であれば同等の専用機を購入するか、マシニングセンタを2台導入して工程分割をすることであったが、高品質・高能率を両立させたことでマシニングセンタ1台のみで対応することができた(図21)。

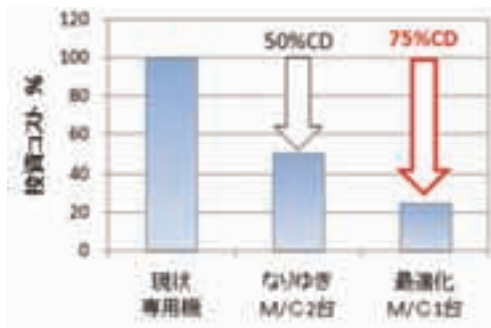


図21 投資コスト削減効果

また、設備更新の要因となった位置精度に関しても、マシニングセンタを採用しノックとスリーブの加工を同一設備にしたことで、位置精度の工程能力が向上し、検査頻度を低減させることができた。

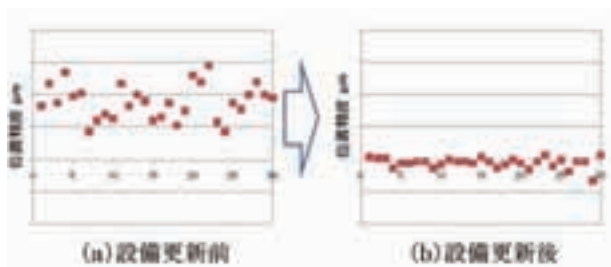


図22 位置精度の効果

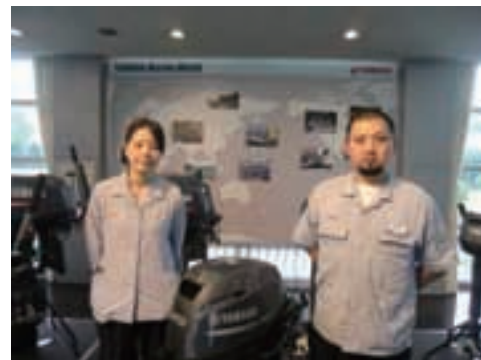
7 今後の展開 ～設備のダウンサイジングの検討～

本活動により、汎用機であるマシニングセンタでもツールや切削条件を理論的に導き出すことで加工可能ということを証明した。今回は専用機から汎用機へのダウンサイジングではあったが、さらなる設備のダウンサイジングによる投資コスト削減について検討を進める。具体的には、今回トライした中型マシニングセンタよりも剛性は劣るが、さらに安価な小型マシニングセンタの採用を視野に入れ、低剛性設備における高精度高負荷切削を実現する技術を構築していく計画である。

参考文献

- [1] 三菱UFJ編集 JETRO「アジア・オセアニア主要都市・地域の関連コスト比較」
- [2] ヤマハ バイク用語辞典より出典
- [3] 切削油技術研究会総会資料 びびりの見分け方とその対策
- [4] 星鐵太郎 機械加工の振動解析 工業調査会
- [5] 日本機械学会講習会資料「切削加工、びびり振動の基礎知識」 日本機械学会
- [6] 多田幸彦 振動解析による設備剛性評価手法の開発 PM 論文
- [7] 星鐵太郎 切削加工における再生びびり抑制の新技术 安定ポケット理論の実用 機械と工具

著者



中井 典子

Noriko Nakai
エンジンユニット
コンポーネント統括部
生産技術部

坂本 祐輔

Yusuke Sakamoto
ヤマハ熊本プロダクツ
製造部
製造技術課