

# 精密スピンドルの異常解明と有効電力を用いた予知保全

## Failure Clarification of Precision Spindle and Predictive Maintenance using Effective Electric Power

鈴木隆光 Takamitsu Suzuki 岩田敏雄 Toshio Iwata 木村 孝 Takashi Kimura

●AM事業部 AM製造部

**要 旨** 品質・コストが重要視される今日、生産設備の再生は重要な課題である。当社でも、積極的に設備の再生を展開しているが、すべての設備を社内で厳密な管理の下で行うことはできず、外部専門業者に委託する場合も多い。今回、精密スピンドルのオーバーホールを外部に委託したが、結果として予期しない初期異常故障が多発した。同様の故障を起こさないために、故障の解明を行い、リニューアル計画保全の仕組みを作り、推進した。さらに、刃具磨耗検知に使われているモーターの有効電力状態監視をスピンドル軸受の異常予知にも適用し、無負荷運転時のしきい値管理による予知保全を進めている。

### 1 はじめに

今日、自動車用エンジン部品において、高品質化・コスト低減などの要求が高まりつつある。設備の生涯についても、設計・製作・使用・廃却の従来の考え方を一変し、再生（リニューアルメンテナンス）により、寿命延長を行うことが、投資削減はもちろんのこと、環境保全の面からも一つの流れになっている。

ヤマハ発動機㈱（以下、当社という）でも、設備のリニューアルを積極的に進めているが、すべての設備を社内で厳密な管理下で行うことはできず、外部専門業者に委託する場合も多い。今回、精密スピンドルのオーバーホールを外部に委託したが、結果として、予期しない初

期異常故障が多発した。

本稿では初期異常故障の対策のため、モーターの有効電力状態監視をスピンドル軸受の異常予知に適用し、しきい値管理により予知保全に活用した試みを報告する。

### 2 初期異常故障の解明

#### 2.1 加工設備概要

今回、リニューアルを実施したシリンダヘッド加工ラインの概要を図1に、本稿の対象設備である専用孔加工機を図2に、製品を図3に示す。

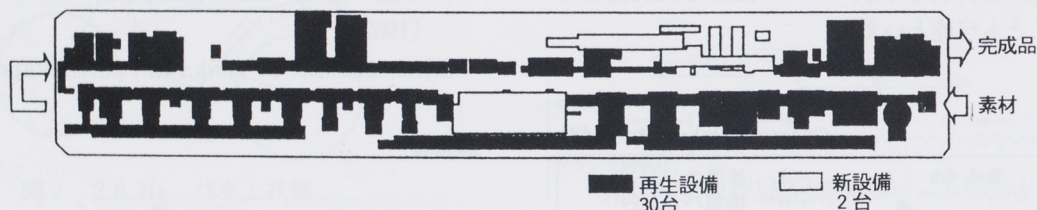


図1 シリンダヘッド加工ライン

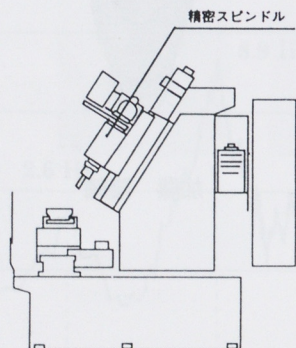


図2 専用孔加工機

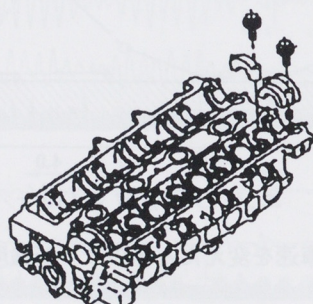


図3 シリンダヘッド



## 2.2 故障データ分析と故障現象

リニューアルメンテナンス後の故障分析結果を、表1に示す。対象の専用孔加工機の精密スピンドルまわりの故障時間が多いのがわかる。また、表2に示すように、それらの故障はリニューアル直後の6ヶ月間に集中していた。精密スピンドルまわりの異常故障現象としては、異音・振動大が多く、分解・点検後、異常部位を調査した結果、図4に示すように、スピンドル後部の円筒ころ軸受に異常が集中していた。ここでは、代表的な次の2例（スピンドル#2-L、#6-R）について、結果を表3に整理した。

表1 対象の専用加工機群の部位別故障分析  
('93. 9~'94. 2)

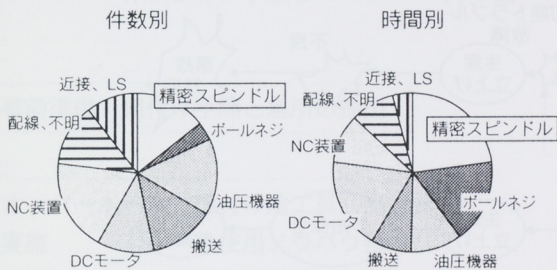


表2 精密スピンドル故障の推移

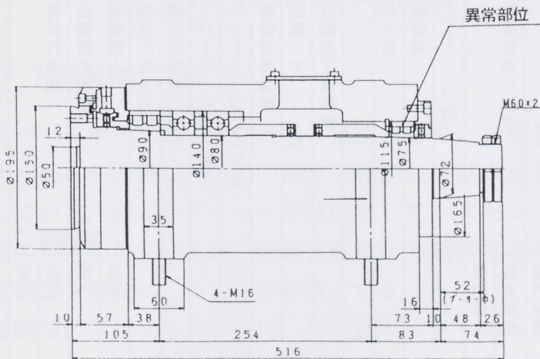
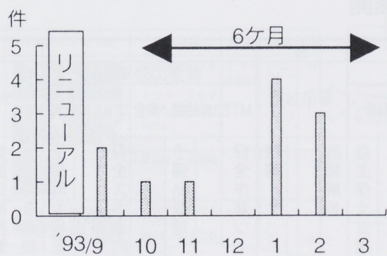


図4 スピンドル構造と異常部位

表3 スピンドルの異常故障現象

スピンドル No.	現象	振動値 データ	損傷状況
#2-L	異音	加速度: A PEAK 19G AVF 9G	
#6-R	振動大	加速度: A PEAK 10G AVE 3.9G	

## 2.3 故障の解明

### (1) #2-Lの例

損傷があった円筒ころ軸受の外輪軌道面に、スラスト方向の傷があり、傷の大きさは、2種類のパターンになっていた。この傷は、図5に示すように、斜め組付けした時にできたものと思われるが、傷付きの原因を解明するため、復元による実証を行った。

図6に示すように、正規の垂直組付けに対し誤った水平組付けの場合、軸の傾きに加え、軸受ころが下に片寄る。さらに、外輪を内輪の後に組み付けた場合、挿入困難となり、無理に入れると外輪が傾き、傷付が再現した。

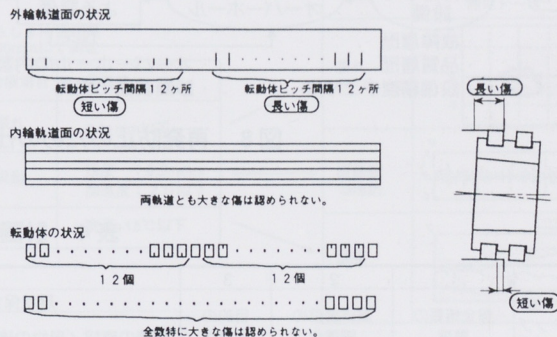


図5 傷パターンと組付け状況

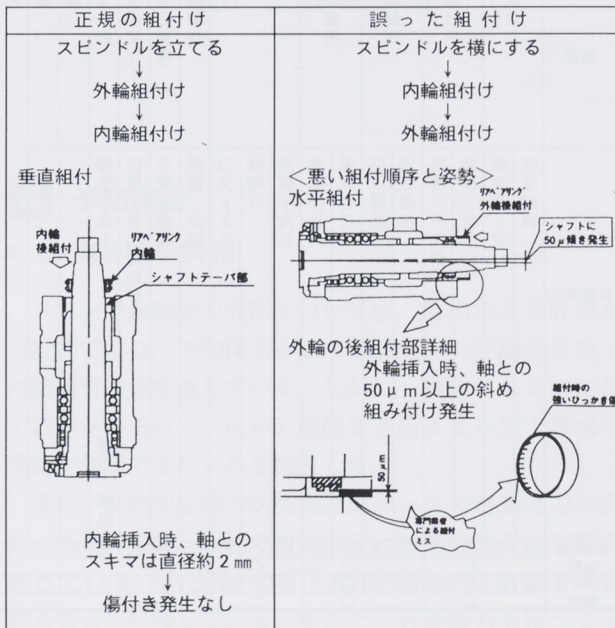


図6 正規の組付けと誤った組付け



(2) # 6-Rの例

上記の誤った組付けに加えて、図7のように、リアプレートが約0.3mm歪んだ跡があり、過剰締付けとスラスト受けのサークリップの倒れにより外輪が変形して、コロを圧迫し、フレーキングに至ったと推定される。

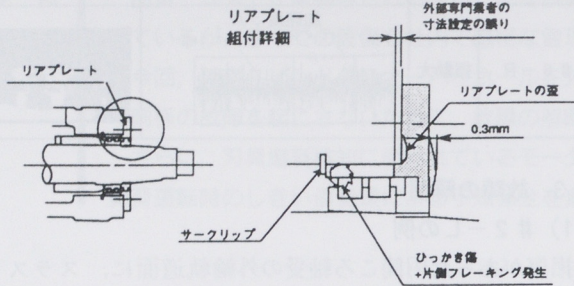


図7 リアプレート過剰締付けの例

3 リニューアル計画保全

前述の誤組付けを解消するとともに、オーバーホール後の状態を定量的に診断、判定できる仕組みが必要である。また、従来の事後保全体制から予知保全体制への転換も求められる。

3.1 計画保全の仕組み作りと推進

上記の課題を達成するために、従来の保全の取り組み方を見直し、図8のように、再発防止のための仕事の仕組みを作り推進した。具体的には、(社)日本プラントメンテナンス協会の7ステップ展開を参考にし、リニューアルに合った使いやすい8ステップ展開表を表4のように作成し、活用した。

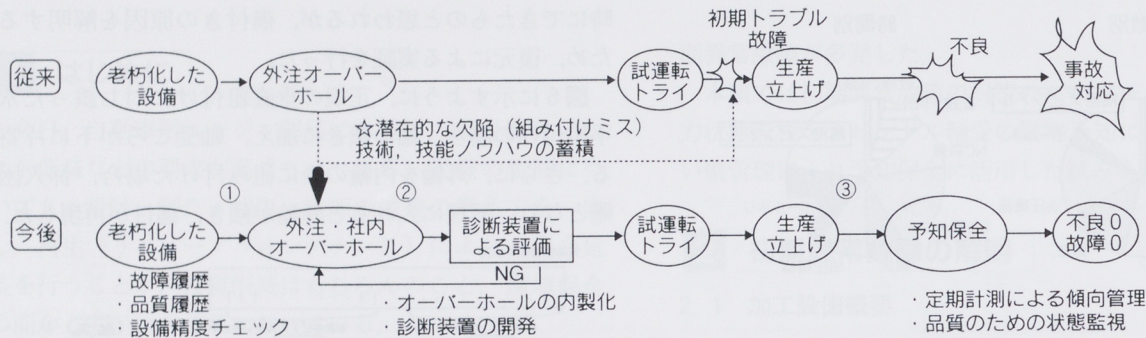


図8 再発防止のための仕事の進め方（リニューアル計画保全）

表4 計画保全の8ステップ展開

実 施 ステップ	1		2		3		4						5		6				7		8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	保全情報の 整理		弱点部位の 明確化		目的の 明確化		現状保全レベルの確認						弱点対策		保全の効率化				予知保全		MP 設計																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
							現場の確認／現物の確認			保全方法と基準の確認					MTTRの短縮／保全コストの低減																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
項目	現状分析	故障分析	弱点箇所	重点箇所		図面管理	予備品管理	保全計画	分解	整備	復元	保全 基準	保全計画	自主保全支援	故障解析	改善	保全作業ツール	予備品管理	保全スキル向上	設備再生技術	設備の条件設定	設備の条件管理	設備モニタリング	状態の監視																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
詳細項目	保全記録	保全データ	要因分析	故障ストラクチャー	弱点部位	弱点部品	重点部位	重点部品	品質不良0	故障0	コストミニマム	図面・取扱	予備品現品	特種工具 補助専用	保全リスト			点検基準書	チェックシート	定期保全カレンダー	トレーニング台	故障探索	PM分析	自社開発工具装置	手順書・マニュアル	計画保全準備棚	ユニット・ブロック交換	オーバーホールの内製化	設備診断装置の開発	予備品の再生利用	製品精度の関係	刃具折れ予知	MP設計要望書																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
																																		部位／部品	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全	専門保全	自主保全

①

②

③



リニューアル計画保全の特徴は次の3本柱である。

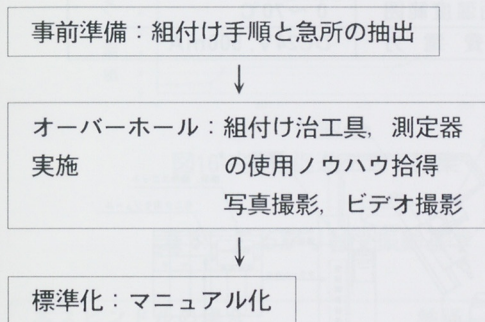
- ① オーバーホールの内製化
- ② 診断装置の開発
- ③ 予知保全

上記①、②については本章で、③については4章で詳細に説明する。

### 3.2 オーバーホールの内製化

分解、整備、復元からさらに一步進めて、技術、技能のレベルアップ、保全コストの削減を目的に、オーバーホールの内製化を試みた。具体的には、初期異常故障につながった組付け不良ポイントを重点に、スピンドル組付けノウハウを、メーカーからの情報をもとに定量化し、マニュアルによる標準化を行った。

マニュアル作成までの手順とマニュアル例を図9に示す。



作業工程表					
工程	作業手順	作業面ポイント面	注意事項	規格	道具 時間
組付	1) 予圧調整 ・NNベアリングF側洗浄 ・ハウジングアウター挿入 (内径測定0セット) ・GNゲージ(セット)		脱脂後軸受けを回さない。 アウタースキマ 0.005の予圧量 ねらい	アウタ 内径127	アボ クリー ナ GN ゲージ リング ゲージ
	2) フロント側フランジ		挿入時シール脱脂		
	3) スピンドルと内輪組付 GNゲージとNNセット挿入 グリス注入(N.B.U15)		GNゲージゆるめて いれる。 挿入面汚れをとる	4.70C	ホイ ナット セット 油圧 ポンプ

図9 マニュアル作成手順と例

### 3.3 診断装置の開発

オーバーホール後の軸受状態の確認として、診断装置により振れや振動などの動的精度を計測し、基準値管理をしている。従来、メーカーで試加工して、スピンドル精度の判定をしていたが、診断装置により動的な振れで精度判定を可能にしたことを特徴とする。

診断項目に対する基準値は、製品精度やメーカー推奨値から決めている。診断装置概要を図10に、定量評価内容を図11に示す。

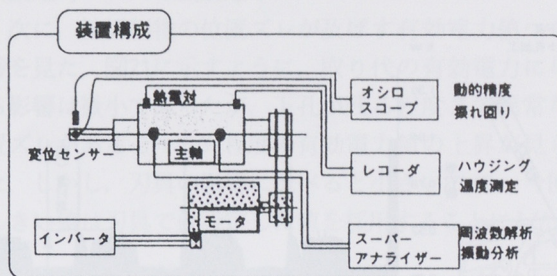
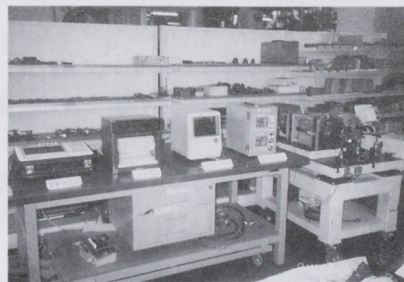


図10 診断装置概要

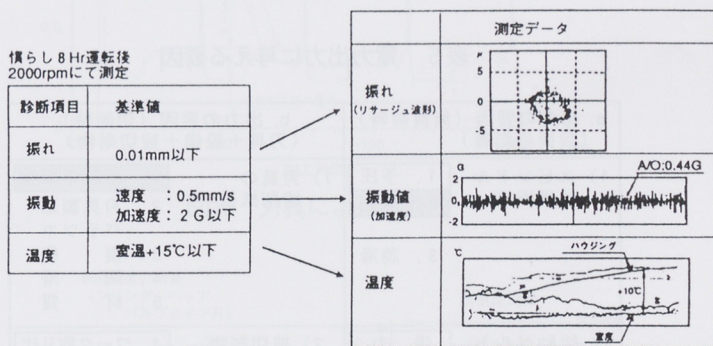


図11 定量評価の内容

## 4 予知保全

### 4.1 有効電力の利用

スピンドル軸受の異常については、振動による計測が一般的であり、予知保全として定期点検の計測値を使った傾向管理を推進している。しかし、振動による方法は工数がかかるので、ほかの簡便な方法により加工職場で異常が判定できないかを検討した。

現在、切削加工時の切削抵抗がモーターの有効電力に表れ、刃具の摩耗、損傷の検知に使われていることが報告されている。<sup>(1)(2)</sup> 当社でも、品質異常が有効電力に表れることを経験している。そこで、有効電力を使うことにより、切削加工時の刃具寿命検知以外、すなわち品質



異常，さらに無負荷運転時にはスピンドル軸受の異常も検知できるのではないかと考え，進めることにした．具体的には，ARTIS社の刃具モニタリング電力計を用いて無負荷運転時と切削加工時のしきい値を決め，電力パターンによる異常判定を試みた．実際の設備運転時の有効電力の出力例を図12に，出力に与える要因を表5に示す．次項に各要因の影響度としきい値を決める手順を述べる．

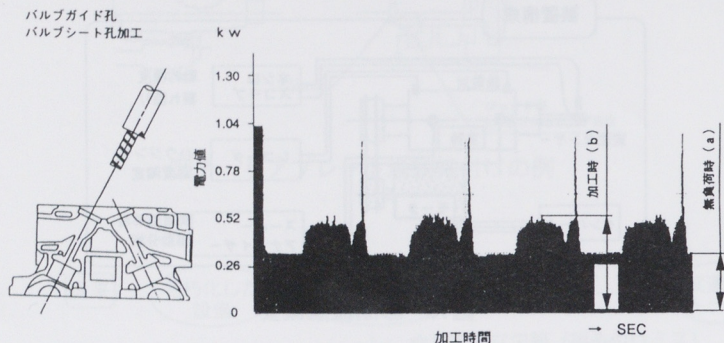


図12 電力出力例

表5 電力出力に与える要因

a. 出力の要因（無負荷時） （設備の影響）		b. 出力の要因（切削時） （刃具＋設備＋被切削物）	
1) スピンドル軸受抵抗	1. 予圧 2. 損傷 3. 潤滑	1) 刃具の切削抵抗	1. 刃具の摩擦 2. 刃具製造バラツキ 3. 損傷 4. 潤滑 5. 材質
2) 駆動ベルト	張 力	2) 被切削物	1. ワーク取り代 2. 素材不良
3) モータ軸受抵抗	1. 予圧 2. 損傷 3. 潤滑	3) 設 備	1. 送り系 2. クランプ 3. 制御系
4) スピンドル回転数	回転変動	4) スピンドル回転数	回転変動

■ 今回のしきい値設定の主眼点  
□ 今回のしきい値設定に考慮した変動要点

## 4. 2 計測データとしきい値設定

### (1) 計測装置

計測装置の概要を図13に示す．ARTIS社の電力計は，サンプリング速度10ms，サンプリング時間は最大20min，刃具モニタリングを主な目的にしたもので，あらかじめ設定した基準値を超えた場合，アラームが出力される機能を持つ．今回の計測は，この電力計を使用した．

### (2) 無負荷運転時の有効電力値

ここでは，設備の影響のうち，スピンドル後部の円筒ころ軸受抵抗の影響をみることに主眼を置いた．オーバー

ホール後の初期異常故障に見られた軸受損傷時の抵抗に近い状態を作り出すため，該当軸受の劣化促進テストを行った．テストの装置構成を図14に示す．劣化促進のため，ゴミをグリース内に封入し，テストを行った．有効電力の出力例を図15に示す．ゴミ封入直後は，噛み込みにより出力が一時的に増加するが，その後は次第に安定する．出力値としては安定後の値を採用した．

図16に劣化促進テストの有効電力値と振動値の計測結果を示す．しきい値の設定にあたっては，平均振動加速度の値をパラメータとして，2 G以上の値を選んだ．2 Gの根拠は，表6のころがり軸受振動基準による．<sup>(3)</sup>

計測装置仕様

仕 様	
定 格 電 圧	A C 100V－max500v
入 力 電 流	MAX:100A
信号出力電流	4－20mA／0－10V
応 答 周 波 数	10Hz～2. 5KHz
設 定 誤 差	± 1 %
周 囲 温 度 範 围	0 ～70℃
消 費 電 力	DC24V, 500mA

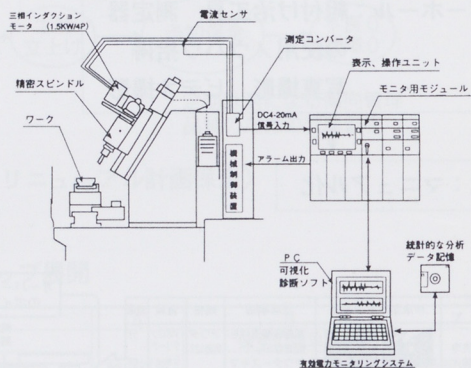


図13 計測装置概要

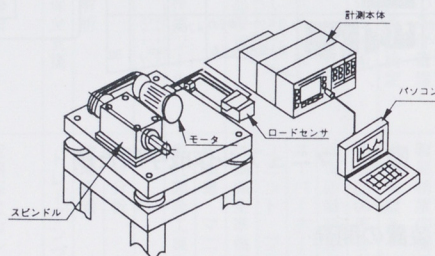


図14 装置構成

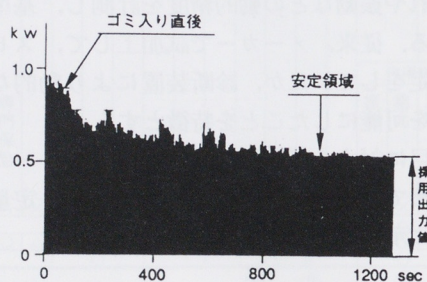


図15 ゴミ入り直後の出力例



ちなみに、オーバーホール後の初期異常故障の平均振動加速度は、表3より9Gと3.9Gであった。

従って、しきい値を図16より、初期設定時+20%と仮設定した。

次に、その他の変動要因について検討した実際の設備で起こりうる変動は、回転数、ベルト張力、予圧でその値は図17の通りである。ここで、予圧は一度設定後は変化がないと仮定すると、回転数の変動値3%、ベルト張力の変動値4%となり、変動値の合計は7%程度で仮のしきい値に大きな影響を与えない。従って、無負荷運転時の有効電力のしきい値は、前述の初期設定時+20%とした。

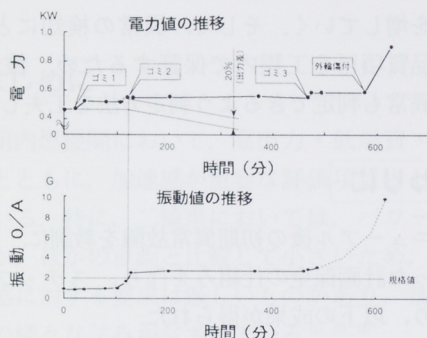


図16 劣化促進テスト結果

表6 ころがり軸受振動基準

本スピンドルの場合	軸径 回転数	75mm 2,000rpm
その時の注意領域は、 AMD転がり軸受判定基準		1.8G～
マシンチェッカーの転がり軸受判定基準		2.1G～

(参考)

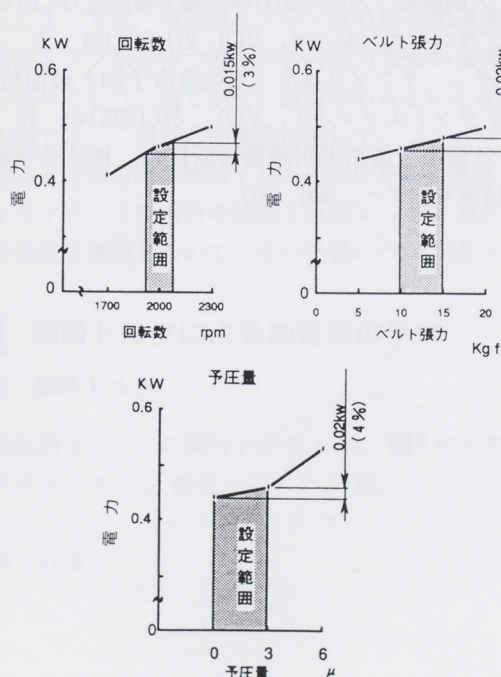


図17 変動要因の電力に与える影響度

### (3) 切削加工時の有効電力値

切削加工時は、主に刃具と被切削物の影響が挙げられる。まず、刃具の影響について検討した。7,000台使い込んだ刃具と新品の刃具の有効電力における差を図18に示す。

また、各々の製品精度の比較を図19に示す。刃具が摩耗すると、製品精度が劣化するのが分かる。しきい値については、図20に示すように、製品精度上の余裕から初期設定時+60%と仮設定した。

次に、被切削物の位置ズレが及ぼす有効電力値への影響を見た。図21に示すように、取り代の有効電力に与える影響は微小であったが、下孔が残る程度まで異常な位置ズレがあると+6%程度の有効電力値の上昇が見られた。しかし、刃具の影響に比べると小さいので、今回のしきい値は刃具で仮設定した値を採用することにした。

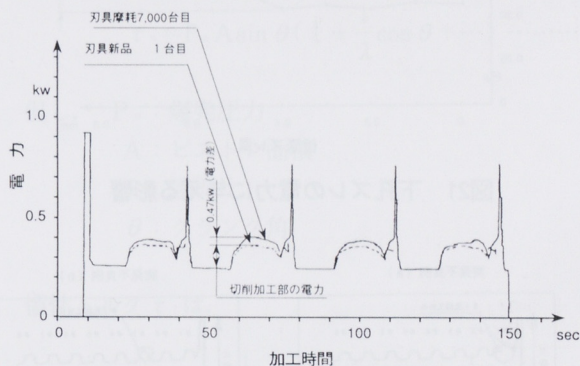


図18 刃具による電力差

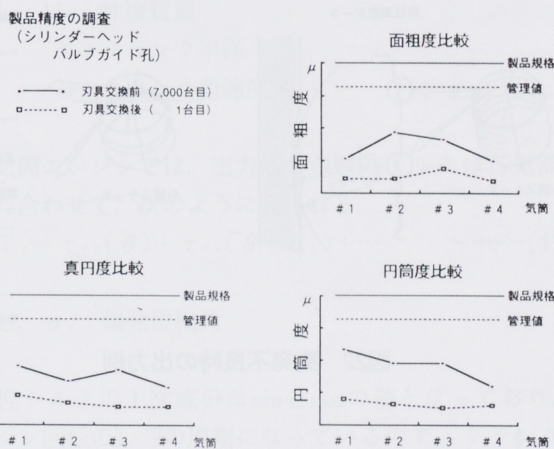


図19 刃具の違いによる製品精度への影響

### (4) 品質上の突発不良検出

有効電力の利用は、突発不良の検出も可能である。図22は前出と異なる電力計で計測したリフタ孔切削加工時の突発不良データである。今回のしきい値設定には織り込んでいないが、被切削物の異常位置ズレ同様、直前データの有効電力値と比較することにより、異常判定可能である。



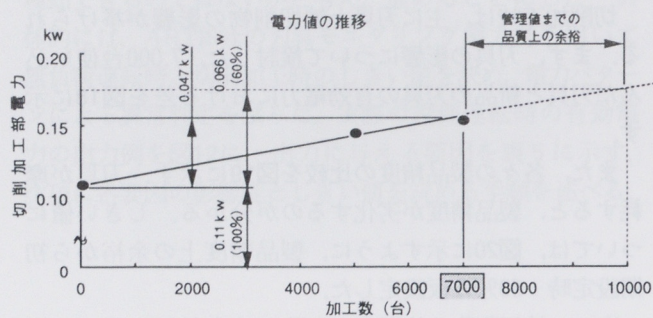


図20 加工台数と有効電力の関係

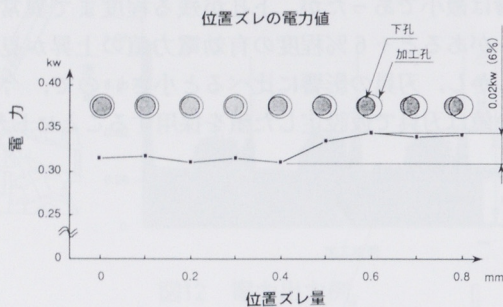


図21 下孔ズレの電力に与える影響

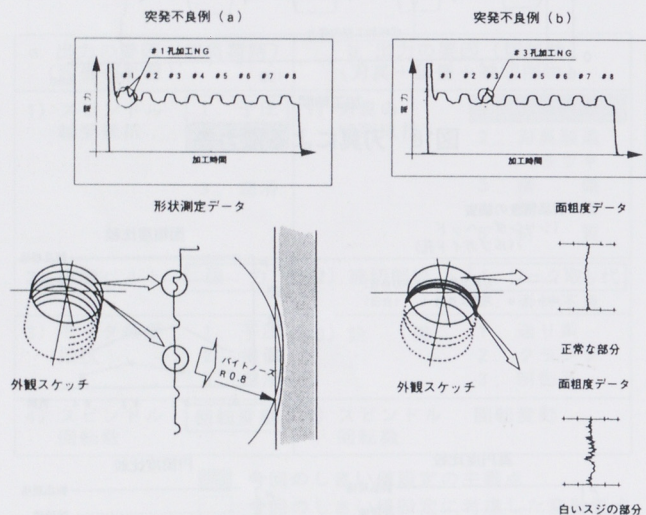


図22 突発不良時の出力例

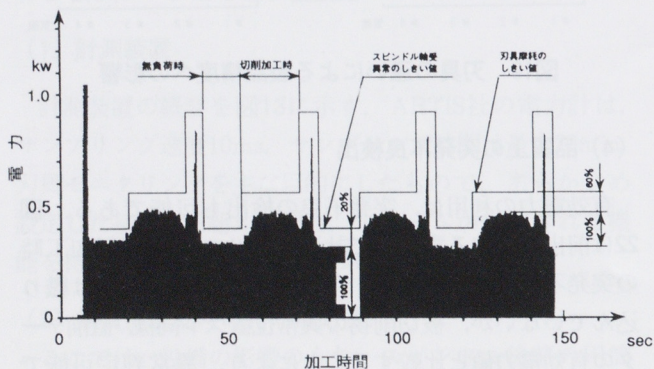


図23 電力パターンによるしきい値設定

## (5) 電力パターンによるしきい値設定

(2), (3)から、図23に示す電力パターンによるスピンドル軸受異常、刃具磨耗のしきい値設定が行えた。刃具モニタリングシステムで同時に、しかも簡便にスピンドルの軸受異常を予知できるのが特長である。

異常判定はノイズの影響を少なくするため、無負荷運転時と切削加工時を各々、積分値（ $\Sigma$ 電力値 $\times$ 時間）による比較判定とした。

## 5 今後の展望

今後さらに、データ蓄積、相関分析を行い、しきい値の信頼性を増していく。そして、異常の検知にとどまらず、重要品質項目を工程内で保証するため、被切削物、突発品質異常も判定できるよう判定方法を工夫していく。

## 6 おわりに

設備リニューアル後の初期異常故障を教訓に、リニューアルに合った計画保全の仕組みを作り、ステップ展開の実施により、以下の成果が得られた。

- ・異常故障の再発防止
- ・オーバーホール作業の標準化と診断装置による定量判定
- ・電力状態監視によるスピンドルの軸受異常予知

さらに、予知保全では、スピンドルの軸受異常、刃具寿命のみならず、品質の工程内保証まで発展できる足がかりができたと考える。

## 参考文献

- (1) 犬飼康宏；刃具の切れ味評価で極限能力に迫る！、プラントエンジニア、VOL. 27(1995)34-39
- (2) チェ チンソクほか；工具寿命予知と破損防止、プラントエンジニア、VOL. 27(1995)40-42
- (3) 牧修市；最新実用設備診断技術、株式会社総合技術センター、506-507